

Grado Universitario en Ingeniería Electrónica Industrial y
Automática
Curso (2016-2017)

Trabajo Fin de Grado

Caracterización de pirómetro de fibra
óptica para medida de temperatura en
entornos industriales

Alumno:

Enrique Blanco Pérez

Directora:

María del Carmen Vázquez García

Leganés, 03/10/2017



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin
Obra Derivada**

Título: Caracterización de pirómetro de fibra óptica para medida de temperatura en entornos industriales.

Autor: Enrique Blanco Pérez.

Directora: María del Carmen Vázquez García.

EL TRIBUNAL

Presidente: Francisco José Rodríguez Urbano

Vocal: Javier Reboul Corpa

Secretario: Robinson Cruzoe Guzmán Martínez

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día 3 de octubre de 2017 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACION de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos:

El haber llegado a este punto de mi vida se lo debo completamente a mi familia que me han apoyado día a día haciendo lo imposible por darme ánimos en los momentos de estudio y por sacarme sonrisas en los momentos duros que no han sido pocos.

Al pensar en la universidad lo primero que me viene a la cabeza son los buenos amigos que he encontrado aquí. Juntos nos enfrentamos a todos los retos que se nos presentaron y hemos compartido los buenos y los malos momentos, dividiendo así las penas y multiplicando las alegrías. Por ello considero que este TFG es en parte obra suya.

Con este proyecto he aumentado forma muy considerable mis conocimientos del mundo de la fibra óptica, también he aprendido a utilizar dispositivos nuevos y he aprendido a aplicar lo aprendido en las asignaturas de la carrera en un caso práctico como es este Trabajo Final de Grado. Esto sin la ayuda de los profesores del Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas no habría sido posible pues me han estado guiando durante este camino.

En especial quiero agradecer a mi tutora Carmen que siempre ha estado pendiente de mí y de mi avance, ayudándome con todas las piedras que han ido apareciendo durante el desarrollo de este trabajo.

A todos ellos, muchas gracias.

Enrique Blanco Pérez.

Resumen

La fibra óptica ha revolucionado las comunicaciones de largo alcance en los últimos años. Pero su impacto no sólo se ha producido en el sector de las telecomunicaciones, sino que abarca diferentes ámbitos. En el campo de la medicina, la creación de los fibroscopios ha dejado atrás las antiguas técnicas para hacer endoscopias. En el mundo militar, las comunicaciones por fibras ópticas son más seguras que el tradicional sistema de comunicación por radiofrecuencia. Y en el sector industrial, más concretamente en los procesos de mecanizado es muy importante conocer la temperatura durante el proceso, ya que ello permite un control sobre el acabado del mismo y de la vida útil de las herramientas de corte utilizadas.

En este trabajo fin de grado se caracterizará un pirómetro a dos colores basado en fibra óptica para la medida de temperatura en un sistema de corte con un torno, donde la fibra permitirá el acceso a zonas en las que no se puede medir de otra manera. Se realizará un análisis del efecto de introducir un conmutador óptico en el pirómetro a dos colores y se discutirá el tratamiento de datos más adecuado para mejorar la precisión en las medidas.

Abstract

Optical fiber has revolutionized technology over the past years. Usually it's related with the sector of telecommunications in different areas.

The field of medicine, for example, it's being renovated due to this element with the creation of medical devices such as fiber scopes which have replaced the ancient techniques to do endoscopies.

In the military world they're also being very practical. The use of communication through optical fibers is safer than the traditional system of communication through radio frequency, which reduces in a large scale the necessity of codifying the messages, therefore resulting in an easier, faster and more efficient method of communication.

In the industrial sector, more specifically at the time of making metal machining it's very critical to know the temperature of the metal, because if the temperature is not adequate the result could not be the one expected. In some machining, just like a cutting system with a torn, the measurement of the temperature with the traditional utensils could be very complicated.

The objective of this final career project is to find a solution and be able to measure the temperature in localized areas that are difficult to access through a system of instrumentation of optic fiber.

Índice de contenidos

Índice de tablas.....	10
1. Introducción	11
1.1 Motivación	11
1.2 Objetivos.....	11
2. Estado de la técnica.....	13
2.1 Medidas de temperatura en el sector industrial.....	13
2.2 Pirometría por fibra óptica	15
3. Pirómetro a dos colores	17
3.1 Principio de funcionamiento	17
3.1.1 Principios físicos	17
3.2 Pirómetro a dos colores desarrollado por GDAF.....	19
4. Análisis de nuevos componentes	22
4.1 Conmutador óptico.....	22
4.1.1 Pérdidas de inserción y crosstalk	23
4.1.2 Medidas de Tiempos de Respuesta.....	26
4.1.3 Medidas de pérdidas del conmutador controlando las condiciones de inyección	28
4.2 Tarjetas de adquisición	31
4.2.1 NI USB 6009.....	31
4.2.2 NI USB 6366.....	31
4.3 Fotodetector	32
4.2.1 Análisis del ruido del fotodetector.....	32
4.4 Discusión	37
5. Sistema de pirometría con conmutador	38
5.1 Configuración del sistema.....	38
5.2 Medidas con el pirómetro a dos colores	40
5.2.1 Medidas tomando todos los datos con el conmutador en Estado Alto	40
5.2.2 Medidas restando al estado alto el estado bajo	44
5.2.3 Medidas seleccionando los datos centrales del estado alto.....	46
5.2.4 Comparación con medidas sin el conmutador.....	50
6 Conclusiones.....	54
7 Trabajos futuros	55
8. Normativa	56
9. Impacto socioeconómico, presupuesto y diagrama de Gantt	57

9.1 Impacto socioeconómico.....	57
9.2 Presupuesto	57
9.3 Diagrama de Gantt	59
10. Referencias	60
Anexos	62
Anexo 1 Hoja de Características Tarjeta de Adquisición NI USB 6366	63
Anexo 2 Hoja de características Tarjeta de Adquisición NI USB 6009	65
Anexo 3 Hoja de características conmutador óptico	67
Anexo 4 Caracterización de conmutadores desarrollada por los investigadores de GDAF	70
Anexo 5 Código en LabView	73

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Comportamiento de la radiación espectral frente a la longitud de onda. Fuente [1]	18
Ilustración 2 Posicionamiento de la fibra frente a la superficie a medir. Fuente [9] ..	19
Ilustración 3 (a) Fibra óptica midiendo la temperatura en el torno de mecanizado. Fuente [9], (b) torno industrial donde se realiza el corte sin acceso desde el exterior	20
Ilustración 4 Esquema del Pirómetro previo de GDAF.	20
Ilustración 5 Foto del pozo calefactor tomada en los laboratios de GDAF	21
Ilustración 6 Foto del cuerpo negro con fibra óptica. Fuente [15]	21
Ilustración 7 Conmutador Óptico. Foto tomada en los laboratorios de GDAF	22
Ilustración 8 Esquema del montaje para medir el crosstalk y las pérdidas de inserción del conmutador	24
Ilustración 9 Esquema de montaje medida 1	28
Ilustración 10 Esquema de montaje medida 2	29
Ilustración 11 Esquema de montaje medida 3	29
Ilustración 12 Esquema de montaje medida 4	30
Ilustración 13 Esquema de montaje medida 5	30
Ilustración 14 Fotodetector empleado en la toma de medidas. Imagen obtenida de [12]	32
Ilustración 15 Responsividad frente a longitud de onda del fotodetector	35
Ilustración 16 Esquema de montaje del pirómetro con conmutador	39
Ilustración 17 Señal conmutadora modificada con valores entre 1 y 0	41
Ilustración 18 Señal conmutadora sin tratar	41
Ilustración 19 Datos a 1310nm y 330°C	45
Ilustración 20 Comportamiento real del conmutador ante cambios de tensión. Amarilla: señal de salida conmutador. Verde: Señal de control	46
Ilustración 21 Señal conmutadora modificada a valores entre 0 y 1 V	47
Ilustración 22 Señal conmutadora modificada y retrasada un cuarto	47
Ilustración 23 Señal multiplicada	47

Ilustración 24 Curva de calibración del pirómetro con conmutador a 1310nm	53
Ilustración 25 Curva de calibración del pirómetro sin conmutador a 1310nm	53

Índice de tablas

Tabla 1 Pérdidas de inserción	23
Tabla 2 Crosstalk Puerto 1 a 1310nm	24
Tabla 3 Crosstalk Puerto 1 a 1532nm	24
Tabla 4 Crosstalk puerto 2 a 1310nm	25
Tabla 5 Crosstalk puerto 2 a 1532nm	25
Tabla 6 Crosstalk puerto 3 a 1310nm	25
Tabla 7 Crosstalk puerto 3 a 1532nm	25
Tabla 8 Crosstalk puerto 4 a 1310nm	25
Tabla 9 Crosstalk puerto 4 a 1532nm	26
Tabla 10 Velocidad de conmutación a 1310nm	26
Tabla 11 Velocidad de conmutación a 1550nm	27
Tabla 12 Duración estados ON y OFF a 1310nm	27
Tabla 13 Duración estados ON y OFF a 1550nm	28

1. Introducción

1.1 Motivación

La evolución y uso de nuevas tecnologías en el sector industrial requiere controles cada vez más precisos sobre la temperatura de los diferentes procesos involucrados. Cada vez se demandan materiales de mejor calidad y para su obtención es necesario poder conocer de forma precisa la temperatura en cada paso de la fabricación. Un ejemplo de hoy en día se ve en la industria aeroespacial, que demanda materiales con los que construir naves más livianas, eficientes y rápidas. El desarrollo de estos materiales se lleva a cabo con la inclusión de súper aleaciones como el inconel en su fabricación.

El mecanizado de estas súper aleaciones produce altas temperaturas en los puntos de corte, estas altas temperaturas pueden generar impurezas en las superficies cortadas, cosa que no sólo afecta al acabado visual de la pieza, sino que también afecta a las propiedades del material como pueden ser la tolerancia de la pieza o su resistencia.

También se pueden producir daños en la herramienta de corte si se alcanzan altas temperaturas durante el mecanizado, produciendo un daño prematuro y acortando su vida útil.

En los procesos de corte de metales suele haber problemas para posicionar el dispositivo de medida a una distancia adecuada del punto de corte. Los sensores de medida por contacto pueden no ser válidos en función del tipo de mecanizado y aquellos sensores de temperatura sin contacto no suelen trabajar bien en zonas tan localizadas como un punto de corte o son de precio muy elevado.

Es por ello por lo que el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas, en adelante denominado **GDAF**, de la Universidad Carlos III desarrolló un pirómetro a dos colores de bajo coste [1] [2] que fuera capaz de medir la temperatura de corte en un torno de mecanizado industrial.

En este Trabajo Final de Grado se estudiará el efecto de introducir un conmutador óptico que genere una señal de chopeo (señal con un estado alto y un estado bajo) en un pirómetro de fibra óptica. El material utilizado para el desarrollo del proyecto se ha financiado parcialmente con los proyectos

SINFOTON-CM (S2013/MIT-2790) y GREENFIBER (TEC2015-63826-C3-2-R).

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado es analizar el efecto de la inclusión de un conmutador óptico en un pirómetro de fibra óptica, en concreto en el sistema desarrollado por los investigadores de GDAF [1]. Para ello como objetivos parciales se plantea la caracterización de los nuevos componentes a introducir en el sistema y el estudio del efecto que tiene el uso de estos componentes en la curva de calibración del sistema que permite la medida de temperatura.

En el nuevo sistema se probarán distintas tarjetas de adquisición de datos para realizar las medidas, en concreto las tarjetas de la marca National Instruments, modelos NI USB 6636, NI USB 6009. La curva de calibración mostrará el voltaje medido frente a la temperatura del cuerpo a medir.

2. Estado de la técnica

2.1 Medidas de temperatura en el sector industrial

Hoy en día se pueden encontrar en el mercado multitud de dispositivos para medir la temperatura. A continuación, se presentan algunos de los sensores de temperatura más empleados en la industria y se analiza la viabilidad de emplearlos para medidas en un torno de mecanizado industrial.

Existen diferentes clasificaciones posibles para los sensores de temperatura, una posible se basa en el tipo de magnitud de salida, en cuyo caso se puede hablar de los tres tipos que se detallan a continuación.

Sensores eléctricos:

-Termopares: Los termopares requieren contacto directo entre la superficie de mecanizado y la unión del termopar, son sensibles a interferencias electromagnéticas, su tiempo de respuesta es limitado y presentan un tiempo de vida reducido ya que son propensos a oxidarse. Por ello no son una solución adecuada para nuestro objetivo.

-Termorresistencias (RTD): Son resistencias cuyo valor varía con la temperatura. Estos sensores tienen un amplio rango de operación con una notable precisión. Los RTD de platino comerciales suelen ser capaces de medir una temperatura máxima de 900°C [3], aunque pueden existir otras de elevado coste con un rango de temperatura mayor. Uno de los principales problemas que presentan para nuestro sistema es que, necesitan estar en contacto directo con el elemento a mecanizar.

-Termistores: Como se muestra en [3] son sensores más baratos que las termorresistencias. No son lineales y tienen una mayor sensibilidad que las termorresistencias. Se componen de una mezcla sintetizada de óxidos metálicos, el termistor es esencialmente un semiconductor que se comporta como un "resistor térmico". Se pueden encontrar en el mercado con la denominación NTC (*Negative Temperature Coefficient*). El rango de temperatura donde suelen trabajar es entre -70°C y 500°C, a pesar de haber algunos que alcanzan los 1000°C.

Su temperatura máxima puede quedarse corta para procesos de mecanizados a altas temperaturas, además de tratarse nuevamente de un sistema de medida por contacto.

Sensores mecánicos:

-Termómetros de vidrio con líquidos: Funcionan por la dilatación de un líquido alojado en un bulbo, que se visualiza en un capilar cuyo pequeño diámetro permite apreciar grandes variaciones de la longitud del fluido dilatado para un determinado volumen. A la hora de querer medir con precisión se encuentran varios problemas como pueden ser los errores generados por la dilatación del tubo de vidrio o los errores debidos a las irregularidades de la superficie transversal del capilar. Además, su posicionamiento en nuestro sistema a medir resultaría muy complicado [4].

-Termómetros bimetálicos: Como se explica en [4] se basan en la diferencia de dilatación de metales tales como: Aluminio, Bronce, Cobre, Latón, Níquel, Níquel-Cromo, Acero, Aleación Hierro – Níquel (36%). El aluminio tiene el mayor coeficiente de dilatación de todos los mencionados. Se obtienen exactitudes del orden del 1% en la medición. Este tipo de termómetros pueden llegar a medir temperaturas de hasta 1000°C. Nuevamente tenemos el inconveniente de que se trata de un sistema de medida por contacto, desechándose su validez para nuestro propósito.

Otra clasificación de los sensores de temperatura puede basarse en el hecho de la necesidad de que el sensor se encuentre o no en contacto con el objeto cuya temperatura se desea medir. En este caso tenemos los dos grandes grupos que se muestran a continuación.

Sensores de medida sin contacto:

-Cámaras térmicas: [2] Estos dispositivos tienen buenas características, como son, una mayor velocidad de detección para variaciones rápidas de temperatura, no requieren contacto directo con la pieza a medir. Sus principales contras son su gran tamaño y la necesidad de que haya una línea directa de visión entre la cámara y la superficie de la pieza a medir. Además de ser dispositivos de alto coste.

Además, la medida de la temperatura usando una cámara térmica depende fuertemente de la calibración que se haya llevado a cabo previamente. Para realizar esta calibración es necesario conocer la emisividad del objeto a medir o bien, realizar una calibración previa con el mismo material que se procederá a medir.

-Termómetros infrarrojos: El aparato consta de una lente que permite captar la emisividad infrarroja del objeto. La lente capta la cantidad de energía infrarroja que emite el objeto y la pasa a un complejo sistema que traduce la energía captada en señal eléctrica, la cual se traduce numéricamente en temperatura en la pantalla del termómetro. Si el termómetro es de una mínima calidad, el aparato compensa con la

temperatura ambiente la cantidad de energía infrarroja captada para evitar errores en las mediciones. Al igual que las cámaras térmicas presentan el inconveniente de su tamaño y de la necesidad de una línea de contacto directa[5].

- **Pirómetros de fibra óptica:** Para solventar los problemas presentados por las anteriores opciones se han desarrollado los pirómetros de fibra óptica. En estos sensores, la radiación emitida por el objeto es captada por una fibra óptica y transmitida a un fotodetector que realiza la conversión opto-eléctrica. Así, la medida de la temperatura vendrá expresada en términos de unidades eléctricas, por lo que será necesario realizar una calibración previa por medio de un cuerpo negro para obtener la relación entre la magnitud eléctrica y la temperatura del cuerpo.

Los sistemas basados en pirometría por fibra óptica destacan por la fiabilidad y la robustez en la medida de temperatura. En este sentido el empleo de fibra óptica aporta grandes ventajas como son la inmunidad electromagnética, flexibilidad, reducido tamaño y peso, pasividad química y eléctrica. Una de las mayores ventajas en el uso de la fibra óptica para la medida de la temperatura en procesos de mecanizado es la posibilidad de poder trabajar a muy altas temperaturas debido a que el punto de fusión de los materiales usados para la fabricación de estas fibras es muy elevado. Para el caso de la fibra de sílice, el punto de fusión del material es de 1600°C, temperatura muy superior al punto de fusión de la mayoría de los metales empleados en la industria. Además, al poder emplear fibras de diversos tamaños podemos emplear el diámetro que mejor se adecue a nuestra superficie de medida. Por tanto, este sistema no presenta problemas de posicionamiento, ni de contacto con la superficie a mecanizar, además de ser capaz de medir temperaturas muy elevadas. Por ello considero que es el mejor método de medida de temperatura para un torno de mecanizado, teniendo en cuenta además las velocidades a las que se realiza el corte. Es por ello que sobre esta opción trabajaremos en este proyecto.

2.2 Pirometría por fibra óptica

La pirometría nació con el alfarero inglés Josiah Wedgwood en el siglo XIX. Por aquel entonces era necesaria la presencia de una persona experimentada que controlase la temperatura de los hornos donde se cocía la cerámica para decidir cuándo debían introducir y sacar las piezas de cerámica en el horno. Dichas personas tenían un salario muy elevado ya que eran personas con mucha experiencia y tenían una gran responsabilidad.

Inicialmente Josiah comparaba el color de las piezas de arcilla en el horno con el color de otras piezas de arcilla cocidas a una temperatura conocida para que así cualquier persona con unas simples instrucciones pudiera saber a qué temperatura debían sacarse las piezas del horno.

Más adelante desarrolló un sistema en el que a través de medir la contracción de piezas de porcelana ubicadas en el interior del horno podía saber la temperatura a la que se encontraba[6].

Desde entonces los sistemas de medida de altas temperaturas fueron evolucionando hasta que en el año 1954 apareció la primera patente de un pirómetro de radiación [7] con el que se podía medir temperaturas por encima de 1200°C utilizando detectores de radiación radiactivos. Era un sistema capaz de medir cuerpos a alta temperatura a plena luz del día. Sin embargo, este sistema no era capaz de medir temperaturas inferiores a 1000°C con una precisión aceptable.

El primer pirómetro a dos colores [8] fue desarrollado en el año 1984, era un sistema capaz de medir temperaturas entre 1200°C y 2500°C. A continuación se detallará que problema técnico resuelve el uso del pirómetro a dos colores.

3. Pirómetro a dos colores

3.1 Principio de funcionamiento

La base de la pirometría con fibra óptica consiste en recoger, a través de la fibra, la potencia óptica irradiada por el cuerpo a medir y realizar la conversión correspondiente para obtener la temperatura del objeto.

En este campo debemos discernir entre dos tipos de pirómetros.

Los pirómetros de un color son aquellos que miden la potencia óptica del objeto dentro de un rango de longitudes de onda determinado. Presentan el inconveniente de depender de la emisividad del objeto a la hora de medir la potencia óptica del mismo, ya que si varía la emisividad del objeto la potencia óptica emitida se verá considerablemente afectada. La emisividad de los objetos puede variar con la temperatura y con la longitud de onda.

Para solventar este problema se desarrollaron los pirómetros de dos colores, véase [9], que basan su principio de funcionamiento en medir la relación entre la potencia óptica radiada en dos rangos de longitudes de onda cuyas longitudes de onda centrales están lo bastante próximas como para considerar que la variación de emisividad entre ambas longitudes de onda es prácticamente despreciable. Además, hay que tener en cuenta que la distancia entre las dos longitudes de onda elegidas deberá de ser lo suficientemente ancha como para poder hacer un filtrado correcto de ambas longitudes de onda sin que se produzca el solapamiento entre ellas. Ya que el solapamiento de los canales en el filtrado podría provocar la dependencia de la emisividad en la lectura de la temperatura, perdiendo así la ventaja respecto al pirómetro de un color.

3.1.1 Principios físicos

En [1] se muestra que la radiación espectral de un cuerpo negro (L_B) viene dada por la ley de Planck:

$$L_B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 * (e^{\frac{C_2}{\lambda * T}} - 1)} \quad (1)$$

donde C_1 y C_2 son las constantes de radiación de Planck, cuyos valores son $1,191 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$ y $1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ respectivamente; λ es la longitud de onda de emisión y T es la temperatura absoluta del cuerpo.

Resulta interesante analizar el comportamiento asintótico de la ley de Planck para longitudes de onda pequeñas. Si se dan valores grandes de $\frac{C_2}{\lambda * T}$ el valor -1 se convierte en un dato despreciable en el denominador de la ecuación. De esta forma se llega a la ley de distribución de Wien:

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 * (e^{\frac{C_2}{\lambda * T}})} \quad (2)$$

donde $\frac{C_2}{\lambda * T} \gg 1$.

En la ilustración 1 se muestra la variación de la radiación espectral frente a la longitud de onda a varias temperaturas empleando tanto la ecuación de Planck como con la de Wien. Las líneas rojas muestran la emisividad siguiendo la ecuación de Planck mientras que las líneas negras siguen la ley de Wien. Las temperaturas elegidas han sido 400°C, 600°C y 800°C. Aumentando la radiación a medida que aumenta la temperatura.

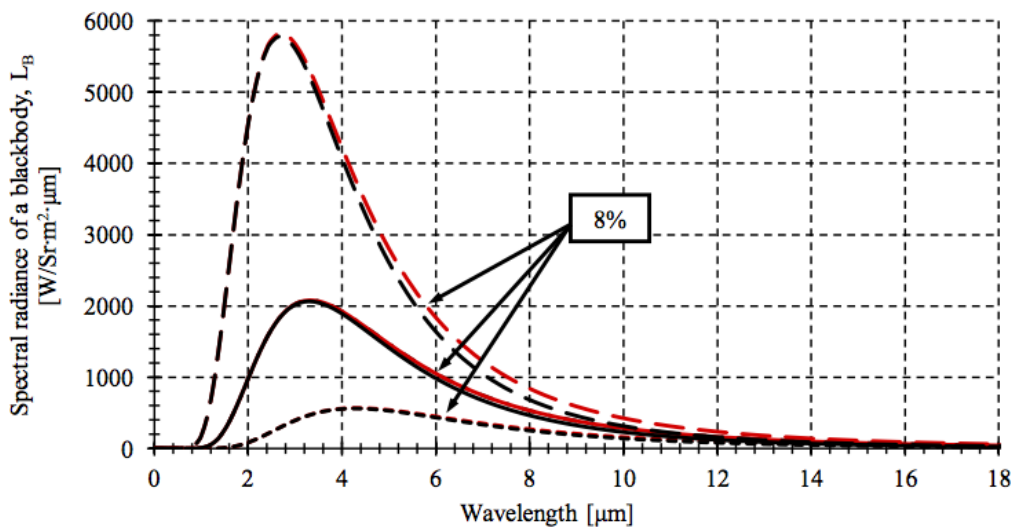


Ilustración 1 Comportamiento de la radiación espectral frente a la longitud de onda. Fuente [1]

La mayoría de los materiales no presentan una emisividad de radiación perfecta. El parámetro ϵ representa la relación entre la radiación emitida por el cuerpo y la del cuerpo negro a la misma temperatura.

La emisividad en una superficie real no es constante, varía tanto por la temperatura como por la longitud de onda. La ratio entre emisividades presenta la siguiente forma:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{L_B(\lambda, T)} \quad (3)$$

Para calcular la radiación espectral de un cuerpo real (L) debemos tener en cuenta su emisividad real (ϵ) llegando a la ecuación 4:

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1 * \epsilon(\lambda, T)}{\lambda^5 * (e^{\frac{C_2}{\lambda * T}})} \quad (4)$$

La radiación emitida por el cuerpo se propaga en todas las direcciones. Sin embargo la fibra solo será capaz de captar los rayos que incidan en la interfaz aire-fibra con ángulo menor al ángulo de aceptación (θ_{MAX}) de la fibra óptica, tal y como se explica en [9]. Este ángulo de aceptación depende del valor de la apertura numérica de la fibra. A su

vez, la apertura numérica depende del índice de refracción del núcleo (*core*) y de la cubierta (*cladding*) de la fibra óptica. El núcleo de la fibra óptica es la zona donde se confina la luz por reflexión total y se permite el guiado de la misma.

Por lo tanto, el posicionamiento de la fibra sobre la superficie a medir es muy importante para maximizar la cantidad de radiación recogida por la fibra.

La fibra debe colocarse en perpendicular a la superficie a una distancia t tal y como se muestra en la ilustración 2.

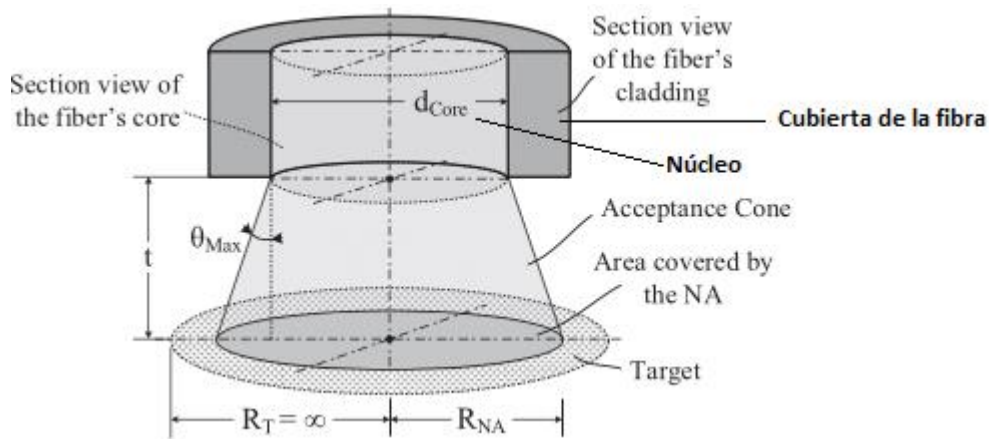


Ilustración 2 Posicionamiento de la fibra frente a la superficie a medir. Fuente [9]

Se considera que el radio de la superficie a medir (R_T) es mucho mayor que el radio de la superficie medida por la fibra óptica (R_{NA}).

Para calcular la corriente medida por el pirómetro a dos colores [9], que se corresponde con la generada por el fotodetector cuando incide la radiación, se emplea la siguiente ecuación:

$$I_{D(T,\lambda)} = \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} \frac{C_1 R(\lambda) IL(\lambda) \alpha(\lambda) \epsilon(\lambda, T) k(\lambda) d\lambda}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (5)$$

Donde $k(\lambda)$ representa las pérdidas de acoplamiento.

Las longitudes de onda más corta y la más larga son λ_A y λ_B . R es la responsividad del fotodetector, IL son las pérdidas de inserción, α es el coeficiente de atenuación de la fibra y d_{core} es el diámetro del núcleo de la fibra.

3.2 Pirómetro a dos colores desarrollado por GDAF

El sistema desarrollado es capaz de medir la temperatura de procesos de mecanizado o corte en áreas donde los sistemas convencionales tienen un difícil acceso.

En concreto se propuso como entorno de medida el punto de corte de un torno de mecanizado industrial.

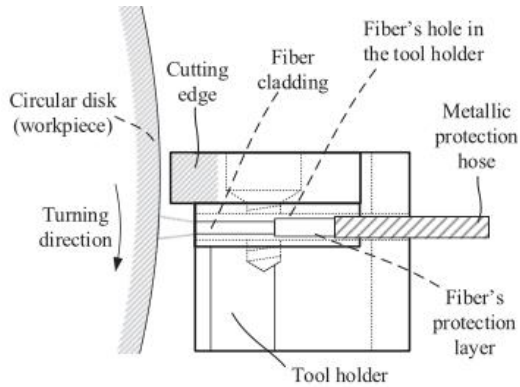


Ilustración 3 (a) Fibra óptica midiendo la temperatura en el torno de mecanizado. Fuente [9], (b) torno industrial donde se realiza el corte sin acceso desde el exterior

En estos entornos no se pueden utilizar cámaras de termografía infrarroja ya que no hay una línea de visión clara con el punto de corte de la herramienta (véase la figura 3.b), como tampoco se pueden adherir termopares u otros sensores de contacto por su deterioro y la dificultad de conseguir una localización accesible. En cambio, se ha resuelto esta dificultad empleando un pirómetro de fibra óptica.

La fibra se posiciona a una distancia de 0,3 mm del cuerpo caliente, dentro de unas agujas metálicas que la protegen. La fibra se conecta a un sistema que procesa la señal óptica y la convierte en una señal eléctrica que será leída por un ordenador [10].

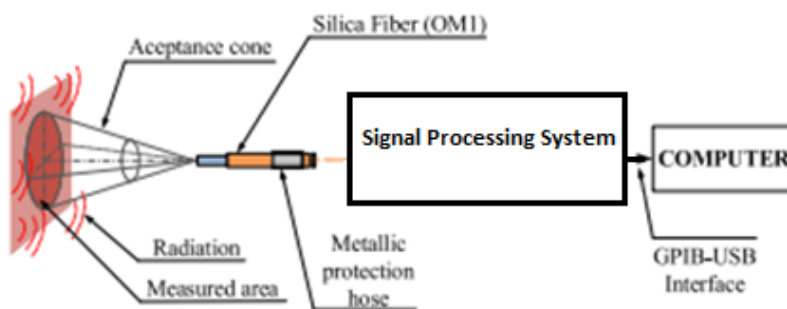


Ilustración 4 Esquema del Pirómetro previo de GDAF.

Para simular los efectos del torno de mecanizado en el laboratorio se utiliza un pozo calefactor ISOTECH JUPITER 650B controlado con un ordenador mediante comunicación RS422. En el interior del pozo calefactor se encuentra un cuerpo negro, pieza metálica cuya emisividad es superior al 99% y que será el cuerpo cuya radiación será medida por la fibra para realizar la calibración. La fibra se posiciona a una distancia de 0,3mm del

cuerpo negro y se fija con un pegamento resistente a muy altas temperaturas quedando de la forma mostrada en la ilustración 5.



Ilustración 5 Foto del pozo calefactor tomada en los laboratorios de GDAF

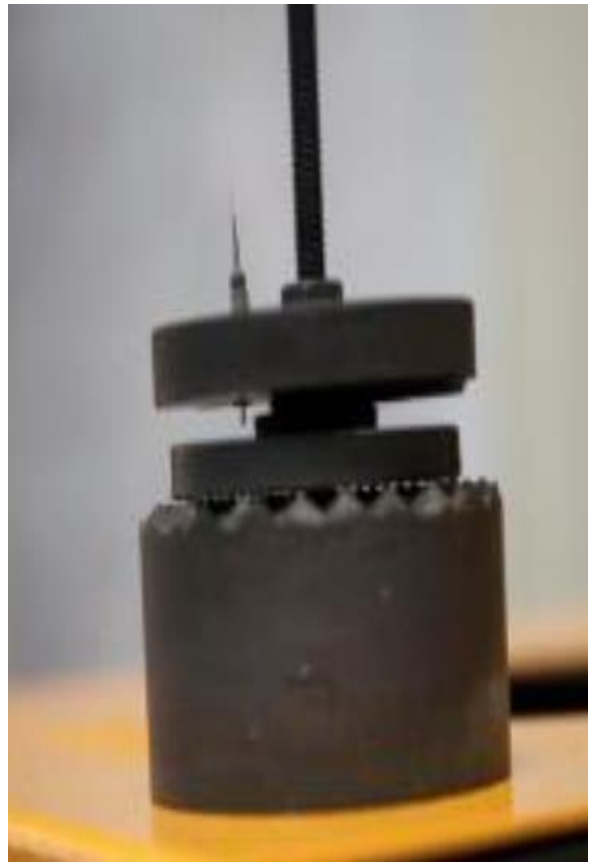


Ilustración 6 Foto del cuerpo negro con fibra óptica. Fuente [15]

Con este sistema se midieron en [1] temperaturas en un rango de 300°C a 650°C con una sensibilidad de $6,98 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$ y un error a fondo de escala del 4,4%. Consiguiendo el propósito de obtener medidas de alta precisión en procesos de mecanizado industriales.

4. Análisis de nuevos componentes

El objetivo del presente trabajo es introducir algunos componentes nuevos en el sistema de pirometría por fibra óptica a dos colores. Es por ello que a continuación se muestra la caracterización de estos nuevos componentes que facilite su posterior integración en el sistema.

4.1 Conmutador óptico

Para nuestro sistema se ha propuesto el uso del conmutador óptico de la marca Agiltron, modelo: LB Quad 1x1 Multimode Fiber Optic Switch. Se trata de un conmutador óptico con cuatro puertos de entradas y cuatro puertos de salida que utiliza un relé electromecánico para realizar la conmutación.

Su función consiste en permitir o denegar el paso de la luz que se inyecta por los puertos de entrada en función de la tensión recibida. Este modelo en concreto deja pasar la luz al no aplicársele tensión (0V) e impide el paso de la luz cuando se le excita con una tensión de 5V.

Para poder caracterizar este elemento se han realizado diversos tipos de medidas que pueden ser divididas en tres bloques: medidas de potencia, medidas de tiempos de respuesta y medidas de ancho de banda. La caracterización se realiza en las dos bandas de longitudes de onda en las que funciona el pirómetro a dos colores.

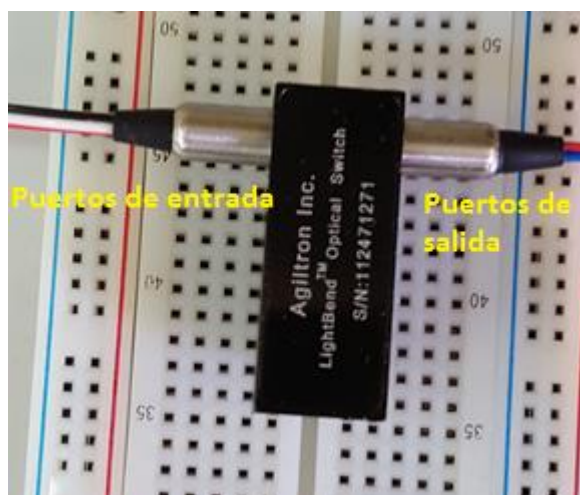


Ilustración 7 Conmutador Óptico. Foto tomada en los laboratorios de GDAF

4.1.1 Pérdidas de inserción y crosstalk

Se han realizado dos tipos de medidas, medidas de las pérdidas de inserción y medidas de crosstalk. A continuación, se definen ambos parámetros y se muestran los resultados obtenidos.

Pérdidas de inserción: Se conocen las pérdidas de inserción (*insertion loss*) como la pérdida de potencia de una señal que atraviesa un dispositivo de transmisión por fibra óptica. Se suele expresar en dB.

En las pruebas realizadas con el conmutador se calculan las pérdidas de inserción de la siguiente forma:

$$P_{\text{InserciónX}}(\text{dB}) = P_{\text{fuente}}(\text{dBm}) - P_{\text{outX}}(\text{dBm}) \quad (6)$$

donde P_{fuente} es la potencia medida a la salida de la fuente de luz empleada para estas medidas (el láser SOF-131-C-LASER SOURCE), que se acopla directamente a uno de los puertos de entrada del conmutador y P_{outX} es la potencia medida a la salida de los puertos del conmutador óptico, siendo P_{out1} la salida del puerto 1, P_{out2} la salida del puerto 2 y así sucesivamente. Las potencias se expresan en dBm y por tanto están referidas de forma relativa a 1mW.

En la tabla 1 se muestran los resultados de las pérdidas de inserción a 1310nm y 1532nm.

	$P_{1310}(\text{dBm})$	$P_{\text{Inserción}}(1310\text{nm})(\text{dB})$	$P_{1532}(\text{dBm})$	$P_{\text{Inserción}}(1532\text{nm})(\text{dB})$
P_{fuente}	9,6	-	8,12	-
P_{out1}	9,33	0,27	8,03	0,09
P_{out2}	9,4	0,2	8,01	0,11
P_{out3}	9,41	0,19	7,91	0,21
P_{out4}	9,36	0,24	7,87	0,25

Tabla 1 Pérdidas de inserción

Crosstalk: Se conoce como crosstalk al parámetro que cuantifica cuando parte de la señal de un canal aparece en otro canal distinto. Se expresa en dB. En este trabajo el crosstalk se cuantifica de la siguiente forma:

$$P_{\text{crosstalkX-Y}}(\text{dB}) = P_{\text{outX}}(\text{dBm}) - P_{\text{outY}}(\text{dBm}) \quad (7)$$

donde P_{outX} es la potencia medida a la salida del puerto seleccionado como salida, continuación de aquel por donde se inyecta la luz. Y P_{outY} es la potencia medida en otro de los puertos de salida no seleccionado. Por ejemplo, para medir la influencia del

puerto 2 en el puerto 1 para estimar el crosstalk se utiliza la siguiente expresión: $P_{crosstalk1-2} = P_{out1} - P_{out2}$, cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 1. Para poder realizar estas medidas a dos longitudes de onda se ha empleado como fuente de luz el láser de Yokogawa AQ2201 y el medidor de potencia óptica de Yamasaki TP01. A continuación, se muestra un esquema del montaje realizado para medir la potencia óptica y obtener los diferentes parámetros.

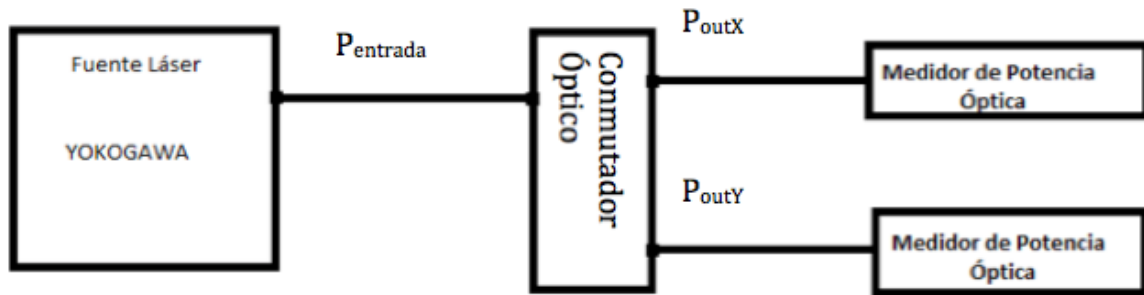


Ilustración 8 Esquema del montaje para medir el crosstalk y las pérdidas de inserción del conmutador

En las siguientes tablas, se presenta el crosstalk en todos los puertos del conmutador a dos longitudes de onda, 1310nm y 1532nm:

El crosstalk a 1310nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 1, entre el puerto de salida 1 y el puerto de salida Y, con Y de 2 a 4:

$P_{out1} = 9,42\text{dBm}$	Puerto 2	Puerto 3	Puerto 4
$P_{outY}(\text{dBm})$	-45,77	-47,40	-47,20
$P_{crosstalk1-Y}(\text{dB})$	55,19	56,82	56,62

Tabla 2 Crosstalk Puerto 1 a 1310nm

El crosstalk a 1532nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 1, entre el puerto de salida 1 y el puerto de salida Y, con Y de 2 a 4:

$P_{out1} = 8,03\text{Bm}$	Puerto 2	Puerto 3	Puerto 4
$P_{outY}(\text{dBm})$	-47,40	-49	-47,16
$P_{crosstalk1-Y}(\text{dB})$	55,43	57,03	55,19

Tabla 3 Crosstalk Puerto 1 a 1532nm

El crosstalk a 1310nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 2, entre el puerto de salida 2 y el puerto de salida Y, con Y el resto de puertos de salida:

$P_{out2}= 9,36\text{dBm}$	Puerto 1	Puerto 3	Puerto 4
$P_{outY}(\text{dBm})$	-46,80	-48,97	-43,80
$P_{crosstalk2-Y}(\text{dB})$	56,16	58,33	53,16

Tabla 4 Crosstalk puerto 2 a 1310nm

El crosstalk a 1532nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 2, entre el puerto de salida 2 y el puerto de salida Y, con Y el resto de puertos de salida:

$P_{out2}= 8,01\text{dBm}$	Puerto 1	Puerto 3	Puerto 4
$P_{outY}(\text{dBm})$	-51,50	-52,45	-47,05
$P_{crosstalk2-Y}(\text{dB})$	59,51	60,46	55,06

Tabla 5 Crosstalk puerto 2 a 1532nm

El crosstalk a 1310nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 3, entre el puerto de salida 3 y el puerto de salida Y, con Y el resto de puertos de salida:

$P_{out3}=9,40\text{ dBm}$	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 4
$P_{outY}(\text{dBm})$	-45,56	-48,30	-48,11
$P_{crosstalk3-Y}(\text{dB})$	54,96	57,7	57,51

Tabla 6 Crosstalk puerto 3 a 1310nm

El crosstalk a 1532nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 3, entre el puerto de salida 3 y el puerto de salida Y, con Y el resto de puertos de salida:

$P_{out3}= 7,91\text{dBm}$	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 4
$P_{outY}(\text{dBm})$	-47,60	-48,68	-49,40
$P_{crosstalk3-Y}(\text{dB})$	55,51	56,59	57,31

Tabla 7 Crosstalk puerto 3 a 1532nm

El crosstalk a 1310nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 4, entre el puerto de salida 4 y el puerto de salida Y, con Y el resto de puertos de salida:

$P_{out4}= 9,36\text{dBm}$	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3
$P_{outY}(\text{dBm})$	-48,50	-46,30	-44,80
$P_{crosstalk4-Y}(\text{dB})$	57,86	55,66	54,16

Tabla 8 Crosstalk puerto 4 a 1310nm

El crosstalk a 1532nm cuando se inyecta la luz en el puerto de entrada 4, entre el puerto de salida 4 y el puerto de salida Y, con Y el resto de puertos de salida:

$P_{out4}= 7,87\text{dBm}$	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3
$P_{outY}(\text{dBm})$	-47,15	-46,80	-46,77
$P_{crosstalk4-Y}(\text{dB})$	55,02	54,67	54,64

Tabla 9 Crosstalk puerto 4 a 1532nm

El valor mínimo del crosstalk indicado en el *Data Sheet* del conmutador por el fabricante es de 35dB, valor que se supera con diferencia en todos los casos medidos, de forma que su efecto será menor en las medidas, si bien es importante ser conscientes de su presencia en la caracterización del pirómetro.

Una vez caracterizadas las pérdidas de inserción y el crosstalk del conmutador procedemos a analizar su velocidad de conmutación y el retraso en su respuesta.

4.1.2 Medidas de Tiempos de Respuesta

En este apartado se analiza el retraso en la respuesta, la velocidad de conmutación, la duración del ciclo de trabajo y del ciclo en estado bajo. Estas pruebas han sido realizadas utilizando como fuente luz el láser de Yokogawa modelo AQ2201, y el osciloscopio de Yokogawa modelo DLM2024 para tomar las medidas de las señales. La señal de conmutación es generada con el generador de funciones de la marca Agilent modelo 33120 A.

Tiempo de retardo: Es importante saber el tiempo que tarda el conmutador en seguir a la señal de conmutación, característica conocida como retardo *switching speed* o velocidad de conmutación, esto es, el tiempo que tarda en conmutar desde que recibe el pulso de la señal de conmutación. A estas medidas las he denominado ΔT_{λ} .

Se han medido en todos los puertos introduciendo una señal de conmutación de onda cuadrada con valor 5Vpp, offset de 2,5V y una frecuencia de 20Hz.

Se han tomado 10 medidas por cada puerto, en la tabla siguiente se muestran la media de los resultados y su desviación estándar a una longitud de onda de 1310nm:

ΔT_{1310}	Media (ms)	Desv. Est (ms)
Puerto 1	1,55	0,10
Puerto 2	1,87	0,28
Puerto 3	1,54	0,16
Puerto 4	1,62	0,18

Tabla 10 Velocidad de conmutación a 1310nm

Los resultados obtenidos a la longitud de onda de 1550nm son los siguientes:

ΔT_{1550}	Media (ms)	Desv. Est (ms)
Puerto 1	1,44	0,11
Puerto 2	1,63	0,03
Puerto 3	1,65	0,08
Puerto 4	1,46	0,13

Tabla 11 Velocidad de conmutación a 1550nm

Se puede apreciar como el conmutador es ligeramente más rápido y más estable a 1550nm que a 1310nm, hecho que tendremos en cuenta a la hora de analizar los resultados de las medidas de temperatura.

Duración del ciclo en estado alto y bajo: El conmutador cambia del estado alto al estado bajo teóricamente cuando recibe una tensión de 5V y pasa del estado bajo al alto cuando la tensión aplicada es de 0V. En la realidad el conmutador cambia de estado antes de alcanzar los valores teóricos, pasa al estado bajo cuando alcanza los 2,7V y al estado alto cuando la señal conmutadora baja hasta 1,2V. Es por esto por lo que al aplicar una señal de conmutación de onda cuadrada con un ciclo de trabajo del 50% la señal conmutada presenta un ciclo de trabajo mayor. Esto fue comprobado en el laboratorio, donde se aplicó al conmutador una señal de onda cuadrada de 5Vpp con un offset de 2,5V y frecuencia 20Hz con el generador Agilent 33120A.

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos a 1310nm tomando diez muestras por puerto:

$\lambda=1310\text{nm}$	Estado alto (media)[ms]	Estado alto (Desv. Est)[ms]	Estado bajo (media)[ms]	Estado bajo (Desv. Est)[ms]
Puerto 1	31,06	0,12	18,91	0,11
Puerto 2	30,40	0,21	19,56	0,18
Puerto 3	30,72	0,33	19,24	0,31
Puerto 4	31,02	0,32	19,06	0,25

Tabla 12 Duración estados ON y OFF a 1310nm

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos a 1550nm tomando diez muestras por puerto:

$\lambda=1550\text{nm}$	Estado alto (media)[ms]	Estado alto (Desv. Est)[ms]	Estado bajo (media)[ms]	Estado bajo (Desv. Est)[ms]
Puerto 1	31,35	0,10	18,65	0,12
Puerto 2	30,93	0,16	18,68	0,24
Puerto3	31,11	0,11	18,83	0,13
Puerto 4	31,35	0,16	18,64	0,14

Tabla 13 Duración estados ON y OFF a 1550nm

Se ve como aproximadamente el ciclo de trabajo de la señal conmutada (cuando se le aplica una señal de un ciclo de trabajo del 50%) es aproximadamente del 60%, un 10% más que la señal conmutadora.

4.1.3 Medidas de pérdidas del conmutador controlando las condiciones de inyección

En la caracterización previa de las pérdidas de inserción del conmutador se ha considerado que la fuente de luz emitía una potencia constante y no se ha analizado en detalle el posible efecto de las condiciones de inyección en la medida de las pérdidas. En este apartado se van a realizar nuevamente medidas de las pérdidas, pero considerando la introducción de componentes adicionales que permitan monitorizar en todo momento la potencia óptica, asegurar unas condiciones de inyección estables y unos niveles de potencia comparables a los que se espera medir con el pirómetro de fibra óptica.

Para ello empleamos una fuente láser y se van añadiendo los diferentes componentes, de forma que se realizan diferentes montajes de medida, en los que se toman valores con dos medidores de potencia ópticos. Los diferentes esquemas de los montajes de medida se muestran a continuación.

1. Montaje de medida 1: Fuente láser → Fibra monomodo angulada.

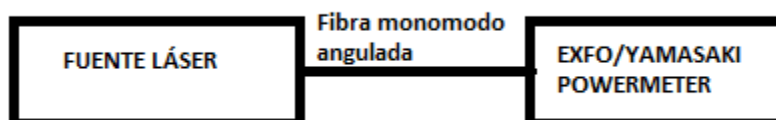


Ilustración 9 Esquema de montaje medida 1

Obtenemos una señal muy estable, es decir, poca o ninguna variación de los valores mostrados por los medidores de potencia ópticos. Se mide la potencia

con dos medidores de potencia óptica de marcas distintas, EXFO y YAMASAKI, obteniendo una potencia de 13,11dBm en ambos casos.

2. Montaje de medida 2: Fuente láser → Fibra monomodo angulada → Divisor de potencia óptica 90-10 %.

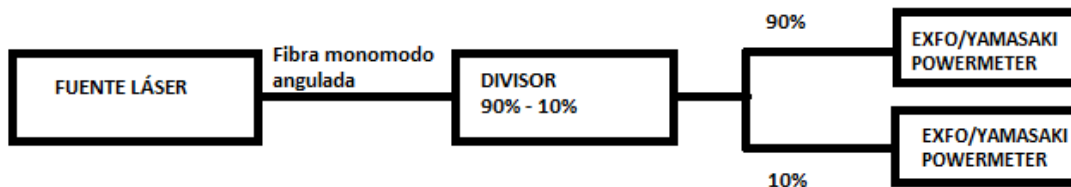


Ilustración 10 Esquema de montaje medida 2

3.

El divisor de potencia óptica separa la potencia recogida a la entrada y la divide por dos canales, uno con el 90% de la potencia óptica mientras que por el otro sale el 10% restante. Incluimos este elemento para poder tener controlada la potencia de entrada durante el resto de toma de medidas, pues sabemos que la potencia a la salida del 10%, en adelante llamada P2 será el 10% de la potencia de entrada al sistema y llamaremos P1 a la otra salida del sistema. En este punto se mide para P1 una potencia de 7,64dBm con el medidor de potencia de la marca EXFO y 7,73dBm con el YAMASAKI. Para P2 tenemos -5,82 y -5,78 dBm con los medidores de EXFO y YAMASAKI respectivamente.

4. Montaje de medida 3: Fuente láser → Fibra monomodo angulada → Divisor de potencia óptica 90-10 % → VOA.

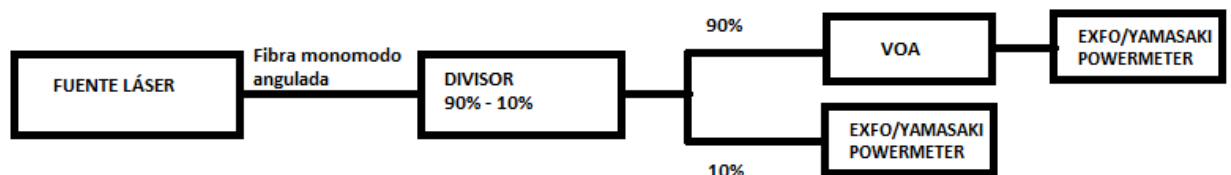


Ilustración 11 Esquema de montaje medida 3

En la salida del 90% conectamos un VOA, atenuador de potencia óptica por sus siglas en inglés. Este elemento reduce la potencia óptica que recibe de forma manual girando una rosca. Atenuamos la señal de P1 con el VOA, leyendo 0,73dBm con el medidor de EXFO y 0,76 con el YAMASAKI. P2 presenta valores de -6,01dBm y -6,02dBm para EXFO y YAMASAKI respectivamente.

5. **Montaje de medida 4: Fuente láser→Fibra monomodo angulada → Divisor de potencia óptica 90-10 % → VOA→Fibra Multimodo.**

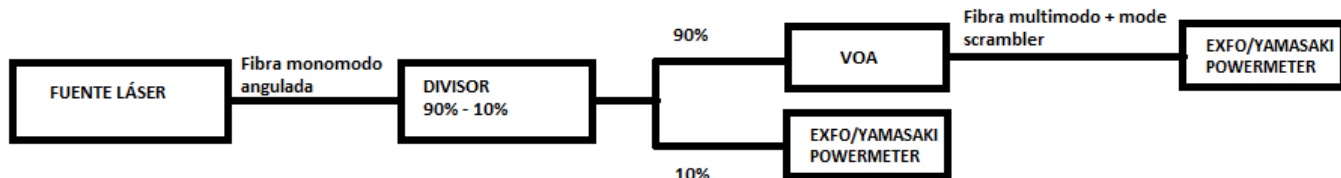


Ilustración 12 Esquema de montaje medida 4

Como el conmutador trabaja con fibra multimodo será necesario conectar una fibra multimodo entre el atenuador y el conmutador. Para estabilizar las condiciones de inyección en la fibra multimodo y asegurar una medida de pérdidas estable se coloca un *Mode Scrambler* (o mezclador de modos) al inicio de la fibra multimodo. El *Mode Scrambler* es un elemento cilíndrico con unas hendiduras donde se enrolla la fibra, de esa forma la fibra multimodo se dobla hasta su radio crítico, es decir, se curva hasta la posición límite a partir de la cual aumentan las pérdidas por curvatura.

Medimos la potencia en P1, donde hemos insertado la fibra multimodo, y obtenemos potencias de 0,41dBm para el medidor de EXFO y 0,39dBm para el YAMASAKI.

P2 mantiene un valor de -6,03 dBm para ambos medidores de potencia óptica.

6. **Montaje de medida 5: Fuente láser→Fibra monomodo angulada → Divisor de potencia óptica 90-10 % → VOA→Fibra Multimodo→Conmutador Óptico.**

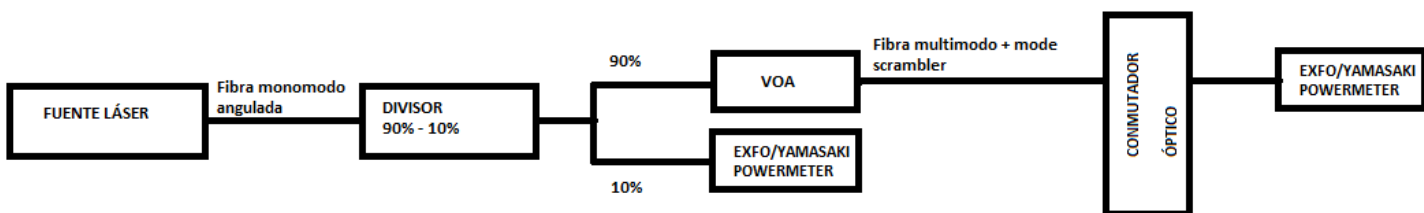


Ilustración 13 Esquema de montaje medida 5

Finalmente introducimos el conmutador óptico a la salida de la fibra multimodo y medimos la potencia a la salida del conmutador. Para realizar esta medida se ha dispuesto el conmutador en estado ON, es decir, permitiendo el paso de la luz a través de él.

Al medir la potencia a la salida del conmutador con los medidores de EXFO y YAMASAKI tenemos potencias de 0,125dBm y 0,16dBm respectivamente.

La potencia en P2 es de -6,01dBm para el medidor EXFO y -6,03 para el YAMASAKI.

Podemos observar como las pérdidas producidas al introducir el conmutador en el sistema son de 0,28dB para el medidor de EXFO y 0,14dB para el YAMASAKI. Vemos por tanto como las pérdidas medidas se corresponden en orden de magnitud con las pérdidas de inserción medidas en el punto 4.1.1

4.2 Tarjetas de adquisición

La adquisición de los datos en este trabajo se ha realizado con programación en LabView, un lenguaje de programación gráfico. Por lo tanto, es imprescindible que las tarjetas de adquisición fuesen compatibles con este entorno de programación. Se seleccionaron las dos tarjetas que se muestran a continuación, para realizar las medidas en este trabajo.

Para calcular el ruido de la tarjeta de adquisición se emplea la fórmula dada en [3] donde dice que la resolución, ó variación de la señal más pequeña que puede detectar la tarjeta de adquisición, se calcula de la siguiente forma:

$$Resolución(V) = \frac{FS(V)}{2^n + 1} \quad (8)$$

Donde FS es el fondo de escala de la tarjeta de adquisición y n es el número de bits de las entradas analógicas de la tarjeta.

4.2.1 NI USB 6009

Con esta tarjeta de adquisición se realizaron las primeras pruebas para que pudiera familiarizarme con el programa LabView y con la adquisición de datos. Es una tarjeta de adquisición sencilla que cuenta con 4 entradas analógicas en disposición diferencial y 8 en modo de terminal único, véase en el anexo **Tarjeta de Adquisición NI USB 6009**.

En el modo de terminal único cuenta con una resolución de 13bits, es decir que si medimos con un rango de $\pm 1V$ la mínima variación que detectará será de 0,244mV.

4.2.2 NI USB 6366

Esta tarjeta dispone de 8 entradas analógicas en modo diferencial y cuenta con una resolución de 16 bits para las entradas analógicas.

Debido a sus mejores características es la tarjeta que se utilizó en la mayoría de las medidas. Al tener una resolución mayor que la NI USB 6009 el ruido de la tarjeta es mucho menor.

Cuando muestreamos a $\pm 1V$:

$$Resolución = \frac{2}{2^{16} + 1} = 0,0305mV \quad (9)$$

Y cuando la toma de muestras se realiza a $\pm 2V$:

$$Resolución = \frac{4}{2^{16}+1} = 0,061mV \text{ (10)}$$

4.3 Fotodetector

Para poder medir la radiación emitida por el cuerpo caliente, el pirómetro necesita un fotodetector. Un fotodetector es un dispositivo que genera una señal eléctrica, dependiente de la potencia de luz que recibe.

En nuestro caso se han utilizado dos fotodetectores de InGaAs, uno para cada longitud de onda (1310nm y 1550nm), de la marca Edmund Optics, con una anchura espectral o rango de longitud de onda en el que es sensible y puede detectar la luz, que va desde los 700nm hasta los 1700nm. En estos fotodetectores se pueden seleccionar dos niveles de ganancia HG o *High Gain* (Ganancia Alta) y LG o *Low Gain* (Ganancia Baja). Estos fotodetectores son muy sensibles a la luz ambiente, por ello se colocaron dentro de una caja tal y como se muestra en la figura 14.



Ilustración 14 Fotodetector empleado en la toma de medidas. Imagen obtenida de [12]

Para poder saber cuál es la mínima medida que puede captar el fotodetector es necesario identificar el ruido de dicho dispositivo.

4.2.1 Análisis del ruido del fotodetector

Para obtener el ruido teórico del fotodetector se ha acudido a su hoja de características [12]. En ella se muestra que el dispositivo tiene una responsividad (R) en alta ganancia de $10^8 V/W$ y su inverso sería de $10^{-5} mW/V$ y presenta un ruido de voltaje en alta ganancia de $1,5 \cdot 10^{-6} \frac{V}{\sqrt{Hz}}$. Sabemos por la hoja de características que el ancho de banda del fotodetector en ganancia alta es de 500Hz, con esto obtenemos el orden de magnitud del valor del ruido en voltios:

$$Noise(V) = 1,5 \cdot 10^{-6} \frac{V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{500Hz} = 0,033mV \text{ (11)}$$

Este valor es coherente con los resultados previos obtenidos en la caracterización realizada por los investigadores de GDAF, que se muestra en el anexo 4 y que se analiza brevemente a continuación.

El *Noise Equivalent Power* (NEP) es una magnitud que engloba todos los términos de ruido del fotodetector cuyas unidades son W/\sqrt{Hz} , incluyendo los propios del circuito de acondicionamiento, y se calcula, empleando las ecuaciones dadas en el capítulo 4 de [13], siendo proporcional a

$\langle i_{rt}^2 \rangle$ que tiene en cuenta todos los términos de ruido del fotodetector (medidos a través de su desviación estándar):

$$\sqrt{\langle i_{rt}^2 \rangle} = \sqrt{\langle i_{térmico}^2 \rangle + \langle i_{disparo}^2 \rangle + \langle i_{oscuridad}^2 \rangle + \dots} \quad (12)$$

donde se ha considerado el ruido térmico, el ruido *shot* o de disparo y el ruido de oscuridad entre otros.

En la caracterización realizada por los investigadores de GDAF (véase el anexo 4), se mide un ruido de -94,83dBm del fotodetector para una frecuencia de 270Hz.

Para convertir este ruido de dBm a mW se emplea la siguiente fórmula:

$$P_{dBm} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{mW}}{1_{mW}} \right) \rightarrow P_{mW} = 10^{\frac{P_{dBm}}{10}} * 1_{mW} \quad (13)$$

Luego si $P_{dBm} = -94,83dBm$, tenemos que: $P_{mW} = 3,288 * 10^{-10} mW = 0,3288 pW$.

Para pasar el ruido de vatios a voltios basta con dividir la potencia por el inverso de la Responsividad del fotodetector:

$$Noise(V) = \frac{P(mW)}{R(\frac{mW}{V})} = \frac{3,288 * 10^{-10} mW}{10^{-5} \frac{mW}{V}} = 0,03288 mV \quad (14)$$

Este valor es coherente con lo estimado previamente.

En el laboratorio realizamos distintas pruebas para analizar los distintos factores que puedan contribuir al ruido de nuestro sistema.

- Prueba 1. Medida de ruido en el fotodetector del canal a 1310nm con las luces del laboratorio encendidas y con el conector FC del fotodetector tapado con un tapón de rosca- Se toman muestras con la tarjeta de adquisición NI USB 6009. Se realizan medidas configurando el fotodetector con la ganancia en estado alto y en estado bajo.

Los resultados de las medidas son los siguientes, en estado de ganancia alto tenemos

una tensión promedio de 16mV con una desviación estándar de 4mV. En estado de ganancia bajo la tensión promedio presenta un valor de 1mV y una desviación estándar de 4mV.

Estas medidas muestran que el ruido será mayor en estado de ganancia alto, cuando el fotodetector es más sensible, si bien trabajaremos con esta configuración dado el bajo nivel de señal para las temperaturas menores. Así mismo, el valor medio no es nulo en ningún caso.

- Prueba 2. Medida de ruido de fotodetectores con la sala en oscuridad y alta ganancia. Con las luces del laboratorio apagadas y las cortinas del mismo bajadas se toman medidas con los fotodetectores dentro de su caja y el conector FC de la caja tapado con un tapón de rosca. Tomamos estas medidas con la tarjeta de adquisición NI USB 6366. se caracterizan los dos fotodetectores, recordemos que cada fotodetector mide una longitud de onda (1310nm y 1550nm), de manera simultánea con un rango de muestreo de $\pm 1V$.

Los resultados de las medidas son los siguientes: A 1310nm se obtiene una tensión promedio de 17,3mV y una desviación estándar de 713 μ V. A 1550nm se obtiene una tensión media de 17,8mV con una desviación de 695 μ V.

Se puede ver como los valores medios de la tensión medida a oscuras son prácticamente iguales a los medidos en la prueba 1. También se aprecia que la desviación estándar en la medida es mucho menor con la tarjeta NI USB 6366 dado que tiene una resolución de 16 bits mientras que la tarjeta NI USB 6009 es de 13 bits. Debido a esta diferencia de tres bits la NI USB 6366 puede medir valores bajos con más precisión que con la NI USB 6009

A partir de ahora se centra el análisis en el ruido del fotodetector encargado de medir la señal de 1310nm, dado que en este canal las señales serán siempre menores.

El sistema presenta por lo tanto un ruido cuando se encuentra en supuesta oscuridad de 17,3mV a 1310nm. A continuación vamos a comparar este valor con el dato previamente analizado y proporcionado por el fabricante en su hoja de características.

En la hoja de características del fotodetector se especifica que el fotodetector tiene un ruido en voltaje de $10^{-6}V/\sqrt{Hz}$, para un ancho de banda de 500Hz (o en estado alto).

En el laboratorio obtenemos un ruido en voltaje de:

$$Noise\left(\frac{V}{\sqrt{Hz}}\right) = 17,3mV * \frac{1}{\sqrt{500Hz}} = 7,737 * 10^{-4} \frac{V}{\sqrt{Hz}} \quad (15)$$

Se trata por tanto de un valor bastante mayor a lo especificado, mayor también a las

caracterizaciones previas del anexo 4, posiblemente las condiciones de medida no sean exactamente las mismas y en cualquier caso habrá que tenerlo en cuenta.

A continuación, se calculan dos de los ruidos más comunes en las medidas con fotodetectores, que son, el ruido térmico y el ruido de disparo.

Recordemos que el NEP se compone principalmente de la suma de los ruidos de disparo, ruido de oscuridad y el ruido térmico.

Ruido térmico ó ruido Johnson asociado a fluctuaciones de corriente aleatorias en función de la temperatura. Debido a la temperatura los electrones comienzan a moverse aleatoriamente dentro del material conductor generando corrientes no deseadas. La corriente de ruido térmico en función de la temperatura se estima como [13]:

$$\text{Corriente Ruido Térmico} = \sqrt{\frac{4 * K_B * T(K) * B}{R_L}} (A) \quad (16)$$

Donde K_B es la constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ J/K), $T(K)$ es la temperatura en grados Kelvin y R_L la resistencia de carga y B el ancho de banda en Hz del circuito acondicionador del fotodetector.

Para estimar la resistencia de carga nos dirigimos a la hoja de características del fotodetector donde se facilita el valor de responsividad, 10^8 V/W y una gráfica con la calibración de la responsividad en A/W (véase la figura 15).

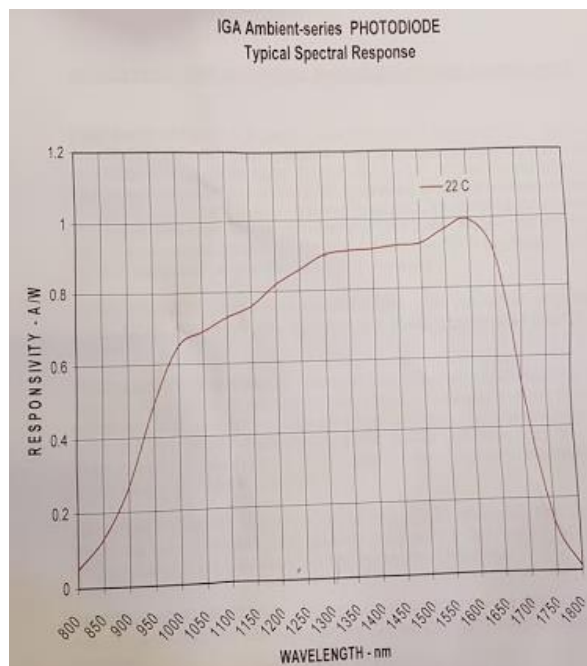


Ilustración 15 Responsividad frente a longitud de onda del fotodetector

Para obtener la resistencia de carga basta con dividir el valor máximo de la responsividad en V/W por el valor máximo de responsividad en (A/W). Se obtiene entonces una resistencia de carga con valor $R_{carga}=10^8\Omega$.

La temperatura de la sala se supone está fijada a 25°C, es decir, 298K.

Con estos datos se calcula el ruido térmico:

$$\text{Corriente Ruido Térmico} = 0,3pA$$

Ruido de disparo y ruido de oscuridad: Son específicos del fotodetector cuando no incide radiación (en oscuridad) o en presencia de luz (disparo). Las expresiones para su cálculo son las siguientes [13]:

$$\text{corriente ruido oscuridad} = \sqrt{2 * q * B * I_{oscuridad}} A \quad (17)$$

$$\text{corriente ruido disparo} = \sqrt{2 * q * B * I_{disparo}} A \quad (18)$$

donde $I_{oscuridad}$ es la corriente de oscuridad del fotodetector (un parámetro característico del mismo), $I_{disparo}$ es la corriente fotogenerada como consecuencia de la incidencia de luz y q es la carga del electrón ($1,6*10^{-19} C$).

En el caso de las medidas previas se tomaron en supuestas condiciones de oscuridad luego a partir de ellas se podría estimar la corriente de oscuridad.

Para calcular la corriente de la señal del fotodetector el fabricante dice en su hoja de características que se debe emplear la siguiente fórmula:

$$V_{out} = I_{signal} * R_f \quad (19)$$

Donde R_f es la resistencia de carga del detector cuyo valor se ha calculado anteriormente y es de $10^8\Omega$ y V_{out} la tensión obtenida a la salida del fotodetector.

Calculamos la corriente que circula por el fotodetector cuando medimos a oscuras una tensión de 17,3 mV.

$$17,3 mV = I_{signal} * 10^8\Omega \rightarrow I_{signal} = 0,173nA = I_{osc}$$

Se obtiene entonces una corriente de oscuridad de 173pA y una corriente de ruido de oscuridad de 0,16pA. Este valor sería comparable al del ruido térmico, luego se concluye que efectivamente éste sería el término dominante.

4.4 Discusión

Resulta de gran utilidad conocer cuál es elemento del sistema de medida que limita la temperatura mínima capaz de ser medida por el pirómetro.

En el caso del pirómetro propuesto en este trabajo se observa que el conmutador introducirá unas pérdidas de inserción adicionales al sistema que reducirán la potencia óptica que llegará a cada fotodetector para una temperatura dada. Por otro lado, al analizar los diferentes términos de ruido del fotodetector se observa que el ruido térmico parece ser el término más limitante en condiciones de oscuridad, al llevar asociado un nivel de ruido de 17,3 mV mientras que la resolución de la tarjeta de adquisición NI USB 6366 es de 0,061mV en el peor caso, cuando mide con un rango de muestreo de ± 2 V.

5. Sistema de pirometría con conmutador

El objetivo principal de este TFG consiste en analizar el efecto que tiene la inclusión de un conmutador óptico en un pirómetro de fibra óptica. Planteándose como objetivos parciales tanto la caracterización de sus elementos de forma aislada, como se ha mostrado en el capítulo 4, como en el sistema completo como se mostrará en este capítulo.

Como se ha descrito anteriormente el conmutador cuenta con dos estados, un estado ON donde permite el paso de la luz y un estado OFF donde se corta el paso de la luz.

5.1 Configuración del sistema

En la ilustración 16 se muestra un esquema del sistema de pirómetro con fibra con conmutador óptico. Los componentes de dicho sistema siguen el siguiente orden de montaje:

1. La fibra óptica multimodo de 62,5 μm de diámetro del núcleo, se colocada dentro del pozo calefactor apuntando a la superficie del cuerpo negro.

Para proteger la fibra y garantizar que la distancia al punto de medida es constante se introduce la fibra es una pirámide de agujas metálicas de diferentes diámetros que irán pegadas a una pieza metálica que tal y como se muestra en [15] establece una distancia de 0,3mm.

La fibra y las agujas irán pegadas a la pieza metálica con un pegamento resistente a altas temperaturas.

2. La fibra del pirómetro que sale del pozo se conecta con la entrada del puerto 1 del conmutador óptico.

Se ha decidido emplear el puerto 1 como puerto transmisor de la señal debido a que, en las pruebas realizadas durante la caracterización del conmutador, este puerto era el que mejor comportamiento presentaba en pérdidas y tiempos de respuesta. El conmutador se controla mediante una señal cuadrada de 5Vpp con un offset de 2,5V y una frecuencia de 10Hz que se obtiene de un generador de funciones. El generador de funciones tiene a su salida dos cables BNC-cocodrilo. Uno de ellos irá directamente a una de las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición, para que ayude en la sincronización posterior de las medidas, mientras que el otro se conectará a los pines del conmutador óptico correspondientes para su control.

3. La salida del puerto 1 del conmutador se conecta a la entrada de la caja de procesamiento de la señal.

Dentro de esta caja se encuentra el sistema de procesamiento del pirómetro con los dos fotodetectores que miden la potencia óptica de los dos canales, en la banda de 1310nm y de 1550nm. Los fotodetectores están dentro de una caja con el fin de que estén en el mayor nivel de oscuridad posible para tratar de minimizar el efecto de la luz ambiente en la toma de medidas.

4. Los conectores BNC-Cocodrilo de los fotodetectores van cada uno a dos de las entradas de la tarjeta de adquisición, puesto que cada señal se muestrearán a dos rangos, $\pm 1V$ y $\pm 2V$. Esto se hace para poder tener medidas fiables incluso cuando se pueda producir la saturación de la medida; por ejemplo, si en algún punto de la medida a altas temperaturas la señal sobrepasa el valor de 1V.
5. La tarjeta de adquisición se conecta al ordenador mediante un conector USB.
6. La temperatura del pozo calefactor es controlada por el ordenador mediante un programa en lenguaje LabView. La conexión entre el pozo y el ordenador se realiza mediante un cable GPIB.

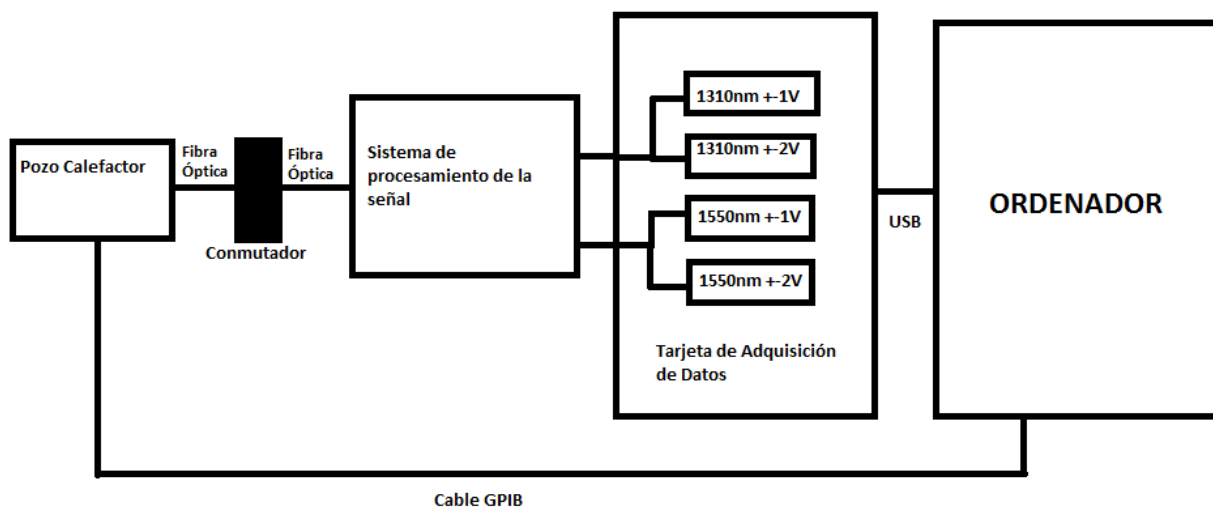


Ilustración 16 Esquema de montaje del pirómetro con conmutador

5.2 Medidas con el pirómetro a dos colores

El pirómetro toma medidas de 5 señales distintas. De la señal obtenida en el canal a 1310nm con el rango de muestreo de $\pm 1V$, la señal de 1310nm con el rango de $\pm 2V$, la señal de 1550nm muestreada a $\pm 1V$, la señal de 1550nm muestreada a $\pm 2V$ y la señal del generador de funciones encargada de forzar el cambio de estado del conmutador.

Con el sistema mostrado en el punto anterior se procede a tomar medidas.

Se miden temperaturas desde los 150°C hasta los 550°C con saltos de 20°C entre temperaturas. Para cada temperatura se toman 500 muestras. Estas muestras serán procesadas con el fin de depurar la señal y reducir el ruido para poder obtener los mejores resultados posibles.

En los puntos siguientes se procesarán las medidas tomadas de formas distintas con el fin de identificar la mejor medida.

A continuación, se presenta un breve resumen de los puntos siguientes donde se muestran los resultados de los distintos análisis realizados con las medidas.

En el punto 5.2.1 se procesan únicamente los datos tomados durante los ciclos en los que el conmutador dejaba pasar la luz.

En el punto 5.2.2 se toman 40 datos de cada temperatura en estado alto del conmutador y 40 de cada temperatura en estado bajo, se realiza la resta de los valores y se calcula el valor medio y la desviación estándar a cada temperatura.

En el punto 5.2.3 se escoge el cuarto central de los datos de la señal tomados durante el estado alto del conmutador, cuando deja pasar la luz.

En el punto 5.2.4 se comparan los valores obtenidos en el punto 5.2.3 con las medidas del pirómetro sin el conmutador.

5.2.1 Medidas tomando todos los datos con el conmutador en Estado Alto

Se procesan únicamente los valores de tensión obtenidos durante el estado alto del conmutador, cuando éste deja pasar la luz. Con estos datos se calcula para cada temperatura el valor medio de los datos tomados y la desviación estándar.

La señal conmutadora, la señal del generador de funciones, no termina de ser una señal cuadrada perfecta de 5V a 0V como se pretendía, sino que es una señal cuadrada de 7,95V y -0,05V con picos de hasta 8,5V y -2V al cambiar de estado.

Esto se debe a que a pesar de estar configurado el generador de funciones en estado de alta impedancia realmente no se configuraba esta opción, generando una señal distinta a la programada. En principio no representa ningún problema para la toma de medidas pues el conmutador deja pasar la señal cuando se encuentra en estado bajo (por debajo de 1V) y corta su paso cuando la señal del generador está en estado alto.

Por ello la señal conmutadora se modifica para conseguir una señal cuadrada de 1Vpp con Offset de 0,5V.

Para poder seleccionar los datos en los que el conmutador deja pasar la luz **invertimos y unificamos** la señal conmutadora. Esto quiere decir: damos valor 0V a los datos de estado alto de la señal conmutadora y valor 1V a los datos en estado bajo de la señal.



Ilustración 18 Señal conmutadora sin tratar



Ilustración 17 Señal conmutadora modificada con valores entre 1 y 0

Multiplicamos la señal conmutadora modificada por los datos obtenidos a 1310nm y 1550nm.

Con esos datos y para cada temperatura se calcula el valor medio y la desviación estándar. Los resultados son los siguientes:

TEMPERATURA		1310±1V	1310±2V	1550±1V	1550±2V	TEMPERATURA		1310±1V	1310±2V	1550±1V	1550±2V
150	MEDIA	0,01739874	0,01739755	0,01803547	0,01808424	370	MEDIA	0,01802819	0,01800811	0,02049392	0,02055189
	DESVEST	0,00071289	0,00070092	0,00066554	0,00060813		DESVEST	0,00058557	0,00058386	0,0005558	0,00053311
170	MEDIA	0,01755983	0,0175601	0,01815568	0,01820402	390	MEDIA	0,01817323	0,01815815	0,02172391	0,02179943
	DESVEST	0,00063674	0,00064772	0,000697	0,00063843		DESVEST	0,00064171	0,00063186	0,00063764	0,00059793
190	MEDIA	0,01755827	0,01755972	0,01814614	0,01819115	410	MEDIA	0,01851323	0,01850133	0,02347785	0,02354905
	DESVEST	0,00072073	0,00073674	0,00074694	0,00067098		DESVEST	0,00062575	0,00062283	0,00060094	0,00056254
210	MEDIA	0,01758061	0,01758008	0,01811654	0,01817353	430	MEDIA	0,01910697	0,01909339	0,02602534	0,02608668
	DESVEST	0,00061685	0,00061446	0,00064701	0,00060476		DESVEST	0,00056325	0,0005575	0,00059932	0,0005742
230	MEDIA	0,01758492	0,01758277	0,01819018	0,01824134	450	MEDIA	0,01988817	0,01987854	0,02956964	0,02964665
	DESVEST	0,00066009	0,00070428	0,00069846	0,00063368		DESVEST	0,00064117	0,00063159	0,0006103	0,0005624
250	MEDIA	0,01755948	0,01755003	0,01818154	0,01823921	470	MEDIA	0,02107536	0,02106086	0,03414453	0,03420531
	DESVEST	0,00066465	0,00068226	0,00065391	0,00060422		DESVEST	0,00061023	0,00061317	0,00051554	0,00048551
270	MEDIA	0,0175321	0,01751442	0,01820105	0,01827765	490	MEDIA	0,02280597	0,02279176	0,04033744	0,04039826
	DESVEST	0,00063313	0,00063812	0,00067203	0,00061836		DESVEST	0,00068462	0,0006894	0,00074207	0,00068414
290	MEDIA	0,01754147	0,01753335	0,01843432	0,01850425	510	MEDIA	0,02493114	0,02490622	0,04847191	0,04852703
	DESVEST	0,00064593	0,00065716	0,00061711	0,00057703		DESVEST	0,0006804	0,00067509	0,00059494	0,00056029
310	MEDIA	0,01762776	0,01762367	0,01868897	0,01875142	530	MEDIA	0,02807401	0,02806419	0,05946	0,05952502
	DESVEST	0,00063173	0,00063671	0,00063006	0,00059436		DESVEST	0,00062504	0,00060504	0,00069508	0,00065031
330	MEDIA	0,01775645	0,0177393	0,01894172	0,01901595	550	MEDIA	0,03228525	0,03227256	0,07288981	0,07294996
	DESVEST	0,00063643	0,00066011	0,00064945	0,00059625		DESVEST	0,00061785	0,00061492	0,00066134	0,00062366
350	MEDIA	0,01781126	0,01780282	0,01957398	0,01963898						
	DESVEST	0,00062788	0,00064388	0,00068033	0,00063439						

Se considera que el sistema empieza a medir cuando las tensiones son siempre crecientes, es decir, cuando para una temperatura mayor la tensión es siempre mayor que para una temperatura menor.

De esta forma se determina que para las longitudes de onda de 1310nm el sistema comienza a medir a partir de los 270°C.

Para las longitudes de onda de 1550nm el sistema comienza a medir a los 250°C.

Si se dedica un momento a analizar los valores previos a que el sistema comience a medir se aprecia que son de valor muy similar a las tensiones obtenidas cuando se realizaron las pruebas del fotodetector a oscuras (Apartado 4.2) cuyo valor era de 17,3 mV. Esto se debe a que la potencia óptica transmitida a la fibra no supera al ruido hasta los 270°C para 1310nm y 250°C para 1550nm. Por tanto, hasta esas temperaturas el sistema está leyendo el ruido del fotodetector.

5.2.2 Medidas restando al estado alto el estado bajo

En el artículo [16] se propone un sistema para eliminar el ruido de la señal medida por un fotodetector mediante una señal de choqueo. Al conmutar la señal medida el fotodetector mide dos estados, un primer estado en el que pasa la señal óptica al fotodetector, de forma que la señal de salida del detector, V_1 viene dada por:

$$V_1 = R_v(S_1 + B) \quad (20)$$

donde R_v es su responsividad, S_1 es la señal óptica y B es el ruido de fondo del fotodetector.

En el segundo estado se cierra el paso de la señal óptica al fotodetector. La señal de salida, V_2 tendría en este caso la siguiente forma:

$$V_2 = R_v(S_2 + B) \quad (21)$$

donde S_2 es la señal óptica entrante al fotodetector y R_v y B los descritos previamente.

Si se restan V_1 y V_2 obtenemos una señal V libre del ruido de fondo del fotodetector:

$$V = R_v(S_1 - S_2) \quad (22)$$

De esta forma se eliminaría del sistema el ruido de fondo en las medidas.

En el laboratorio se realizó esta prueba restando a los valores del estado alto los valores del estado bajo. Se recuerda que durante el estado bajo el conmutador corta el paso a la luz entrante mientras que en el estado alto el conmutador permite el paso a la señal óptica.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al realizar dicha resta para las medidas realizadas a 1310nm y con un rango de muestreo de $\pm 1V$:

Temperatura	Media	Desv Est	Temperatura	Media	Desv Est
150°C	-0,000275	0,000918	370°C	0,00022	0,00092
170°C	-0,000069	0,000866	390°C	0,00025	0,00096
190°C	-0,000091	0,001193	410°C	0,00060	0,00090
210°C	0,000164	0,000846	430°C	0,00067	0,00096
230°C	0,000082	0,000717	450°C	0,00124	0,00090
250°C	-0,000155	0,001020	470°C	0,00195	0,00094
270°C	0,000269	0,000962	490°C	0,00287	0,00081
290°C	-0,000041	0,000939	510°C	0,00422	0,00125
310°C	-0,000073	0,000819	530°C	0,00640	0,00121
330°C	-0,000042	0,000984	550°C	0,00890	0,00176
350°C	0,000010	0,001012	RESULTADOS 1310nm $\pm 1V$		

Vemos como los resultados empeoran considerablemente respecto a las medidas procesadas sin restar el estado bajo al estado alto. De hecho, el sistema a 1310nm no comienza a tomar resultados continuamente ascendentes hasta los 350°C y la desviación estándar aumenta.

Esto se debe a que en este sistema el ruido dominante a temperaturas bajas, no es el ruido de fondo sino el del propio fotodetector. Se puede apreciar este hecho cuando se representa los datos recogidos de una señal a una temperatura en concreto. Por ejemplo, en la siguiente ilustración se muestran los valores que toma la señal medida de 1310nm con un rango de $\pm 1V$ a 330°C:

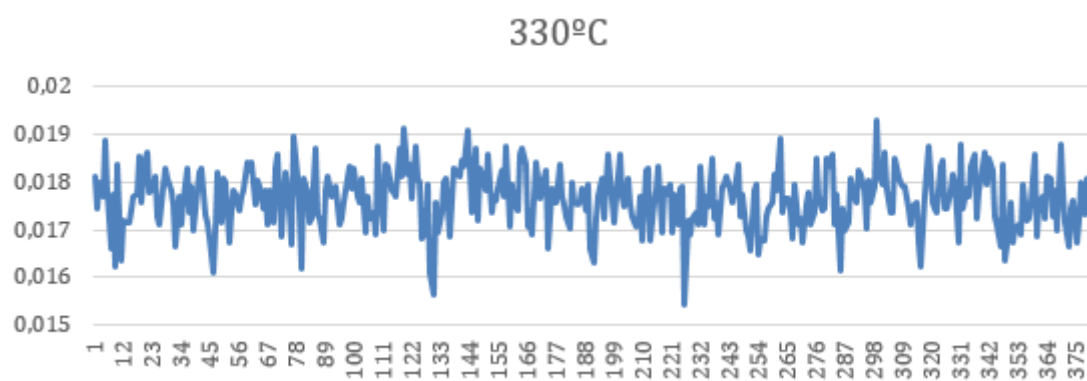


Ilustración 19 Datos a 1310nm y 330°C

Se ve como no se aprecian diferencias entre el estado alto y el estado bajo. Por ello, no es una solución útil realizar la resta para los valores bajos de temperatura.

Como ya hemos dicho, esto se debe en parte al ruido del fotodetector medido en el apartado 4, cuyo valor promedio era de 17,3 mV, que distorsiona la señal medida

haciendo imposible discernir entre valores de estado alto y valores de estado bajo para las bajas temperaturas.

5.2.3 Medidas seleccionando los datos centrales del estado alto

Al analizar las medidas se puede ver cómo cuando el conmutador está próximo a cambiar de OFF a ON comienza a dejar pasar un poco de potencia óptica antes de alcanzar la tensión umbral teórica. Esto se aprecia con más facilidad en la ilustración 20 donde en color amarillo se muestra la señal de salida del conmutador y en color verde la señal encargada de excitar al conmutador que se controla con una fuente de alimentación variable.

Cuando se reduce la señal de la fuente de alimentación hasta valores próximos a 0V se ve como el conmutador comienza a dejar pasar luz, aumentando la señal.



*Ilustración 20 Comportamiento real del conmutador ante cambios de tensión.
Amarilla: señal de salida conmutador. Verde: Señal de control*

Para evitar esas medidas engañosas se decidió tomar únicamente los datos centrales del estado alto. Para seleccionar los datos centrales se opera con la señal conmutadora. Se multiplica la señal conmutadora modificada por la misma señal retrasada un cuarto. De esta forma se aísla el cuarto central del estado alto, quedando como se muestra en la ilustración 22.

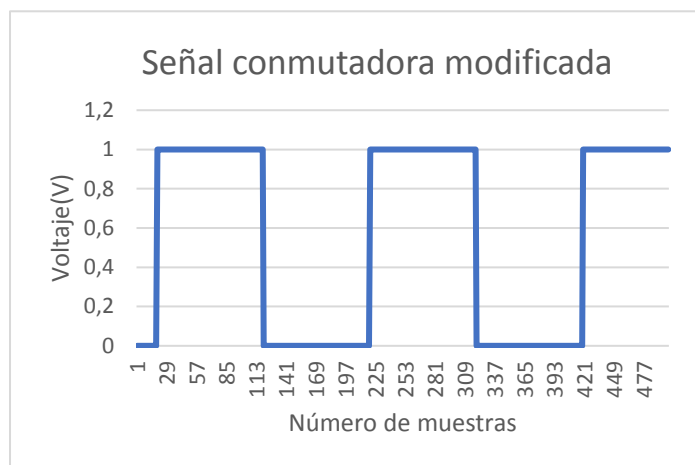


Ilustración 21 Señal conmutadora modificada a valores entre 0 y 1 V



Ilustración 22 Señal conmutadora modificada y retrasada un cuarto

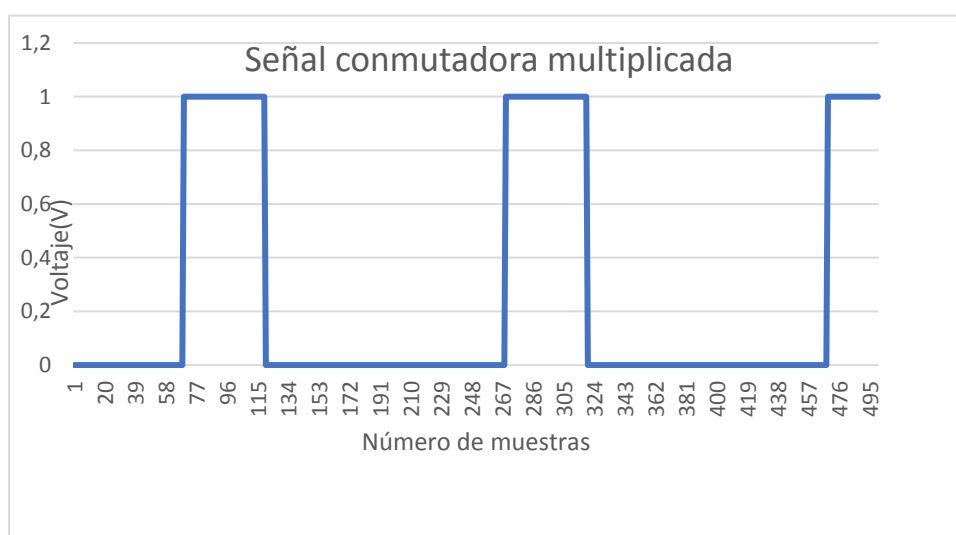


Ilustración 23 Señal multiplicada

Multiplicando esta señal por los datos obtenidos se asegura el empleo de los datos centrales en estado ON del conmutador, véase la ilustración 23. De esta forma se espera mejorar las medidas del sistema planteado en el punto 5.2.1

En la siguiente hoja se muestran los resultados obtenidos una vez seleccionados los datos centrales del estado al

TEMPERATURA (°C)		1310nm ±1V	1310nm ±2V	1550nm ±1V	1550nm ±2V	TEMPERATURA (°C)		1310nm ±1V	1310nm ±2V	1550nm ±1V	1550nm ±2V
150	MEDIA	0,0173	0,0173	0,0181	0,0181	370	MEDIA	0,0178	0,0178	0,0205	0,0205
	DESVEST	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006		DESVEST	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005
170	MEDIA	0,0174	0,0174	0,0179	0,0180	390	MEDIA	0,0183	0,0183	0,0218	0,0219
	DESVEST	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006		DESVEST	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
190	MEDIA	0,0176	0,0176	0,0181	0,0181	410	MEDIA	0,0186	0,0186	0,0236	0,0237
	DESVEST	0,0007	0,0007	0,0009	0,0008		DESVEST	0,0008	0,0007	0,0005	0,0005
210	MEDIA	0,0170	0,0170	0,0176	0,0177	430	MEDIA	0,0193	0,0193	0,0261	0,0262
	DESVEST	0,0032	0,0032	0,0033	0,0033		DESVEST	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
230	MEDIA	0,0175	0,0175	0,0180	0,0181	450	MEDIA	0,0198	0,0198	0,0294	0,0295
	DESVEST	0,0006	0,0007	0,0007	0,0007		DESVEST	0,0007	0,0007	0,0008	0,0008
250	MEDIA	0,0175	0,0175	0,0180	0,0181	470	MEDIA	0,0210	0,0210	0,0341	0,0341
	DESVEST	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007		DESVEST	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005
270	MEDIA	0,0173	0,0174	0,0182	0,0183	490	MEDIA	0,0228	0,0228	0,0406	0,0406
	DESVEST	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006		DESVEST	0,0008	0,0008	0,0009	0,0008
290	MEDIA	0,0174	0,0174	0,0183	0,0184	510	MEDIA	0,0251	0,0251	0,0486	0,0486
	DESVEST	0,0006	0,0006	0,0005	0,0004		DESVEST	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005
310	MEDIA	0,0176	0,0176	0,0189	0,0190	530	MEDIA	0,0282	0,0281	0,0595	0,0596
	DESVEST	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005		DESVEST	0,0006	0,0005	0,0007	0,0006
330	MEDIA	0,0180	0,0180	0,0191	0,0192	550	MEDIA	0,0324	0,0324	0,0730	0,0730
	DESVEST	0,0005	0,0006	0,0007	0,0006		DESVEST	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005
350	MEDIA	0,0177	0,0177	0,0194	0,0195						
	DESVEST	0,0007	0,0008	0,0009	0,0008						

Al analizar estos resultados y compararlos con los medidos en el apartado 5.2.1, donde se analizan todos los datos del estado alto, lo primero que se ve es que la desviación estándar disminuye ligeramente. La medida mínima del sistema no disminuye para 1310nm, sigue estando en 270°C, disminuyendo para las longitudes de onda de 1550nm hasta los 210°C. Por tanto, se comprueba como escogiendo los datos centrales disminuye el ruido de la señal obteniendo de esta forma mejores resultados.

5.2.4 Comparación con medidas sin el conmutador

Una vez analizadas las medidas del sistema completo se procede a quitar el conmutador para poder comparar la inclusión del conmutador con el sistema sin él, en cuanto a la toma de medidas.

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados obtenidos a 1310nm y 1550nm con los rangos de medida $\pm 1V$ y $\pm 2V$.

TEMPERATURA (°C)		1310 ±1V	1310 ±2V	1550 ±1V	1550 ±2V	TEMPERATURA (°C)		1310 ±1V	1310 ±2V	1550 ±1V	1550 ±2V
150	MEDIA	0,0223	0,0223	0,0223	0,0224	370	MEDIA	0,0378	0,0378	0,1341	0,1342
	DESVEST	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005		DESVEST	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008
170	MEDIA	0,0225	0,0225	0,0225	0,0225	390	MEDIA	0,0479	0,0478	0,1933	0,1934
	DESVEST	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006		DESVEST	0,0006	0,0005	0,0006	0,0006
190	MEDIA	0,0225	0,0225	0,0226	0,0227	410	MEDIA	0,0640	0,0640	0,2812	0,2813
	DESVEST	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006		DESVEST	0,0007	0,0007	0,0005	0,0005
210	MEDIA	0,0226	0,0226	0,0232	0,0233	430	MEDIA	0,0877	0,0877	0,3985	0,3986
	DESVEST	0,0008	0,0008	0,0009	0,0008		DESVEST	0,0006	0,0007	0,0006	0,0000
230	MEDIA	0,0223	0,0223	0,0241	0,0243	450	MEDIA	0,1234	0,1234	0,5663	0,5664
	DESVEST	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006		DESVEST	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005
250	MEDIA	0,0227	0,0227	0,0263	0,0264	470	MEDIA	0,1747	0,1747	0,7908	0,7909
	DESVEST	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005		DESVEST	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006
270	MEDIA	0,0232	0,0232	0,0302	0,0303	490	MEDIA	0,2463	0,2463	1,0246	1,0806
	DESVEST	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007		DESVEST	0,0006	0,0005	0,0000	0,0006
290	MEDIA	0,0238	0,0238	0,0369	0,0370	510	MEDIA	0,3485	0,3485	1,0246	1,4491
	DESVEST	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008		DESVEST	0,0006	0,3409	0,2140	0,7307
310	MEDIA	0,0252	0,0253	0,0479	0,0480	530	MEDIA	0,4818	0,4818	satura	1,9437
	DESVEST	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006		DESVEST	0,0005	0,0004	satura	0,0006
330	MEDIA	0,0272	0,0272	0,0649	0,0650	550	MEDIA	0,6682	0,6682	satura	satura
	DESVEST	0,0008	0,0007	0,0008	0,0008		DESVEST	0,0009	0,0008	satura	satura
350	MEDIA	0,0311	0,0311	0,0921	0,0922						
	DESVEST	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007						

En este caso a 1310nm el sistema empieza a tomar valores siempre ascendentes a partir de los 270°C, igual que con el conmutador.

A 1550nm el sistema presenta a partir de los 150°C una tendencia ascendente, sin embargo, los valores obtenidos a esa temperatura son del orden de magnitud de los medidos en oscuridad, en torno a los 17mV.

Por ello se determina que el sistema comienza a medir a partir de los 210°C pues es cuando empieza a aumentar en mayor medida la señal.

Cabe destacar que tanto para los rangos de $\pm 1V$ y $\pm 2V$ el sistema acaba saturando a 1550nm. Esto se debe a que quitando el conmutador la potencia óptica transmitida es mucho mayor, entre otros, se evitan las pérdidas introducidas por el conmutador.

Otra característica que cabe destacar es que la desviación típica quitando el conmutador es ligeramente mayor que la obtenida en el análisis del apartado 5.2.3. Esto es debido a que en el apartado 5.2.3 nos quedamos con los datos centrales de la medida, es decir, aquellos datos más estables pues nos ahorramos las variaciones de los extremos.

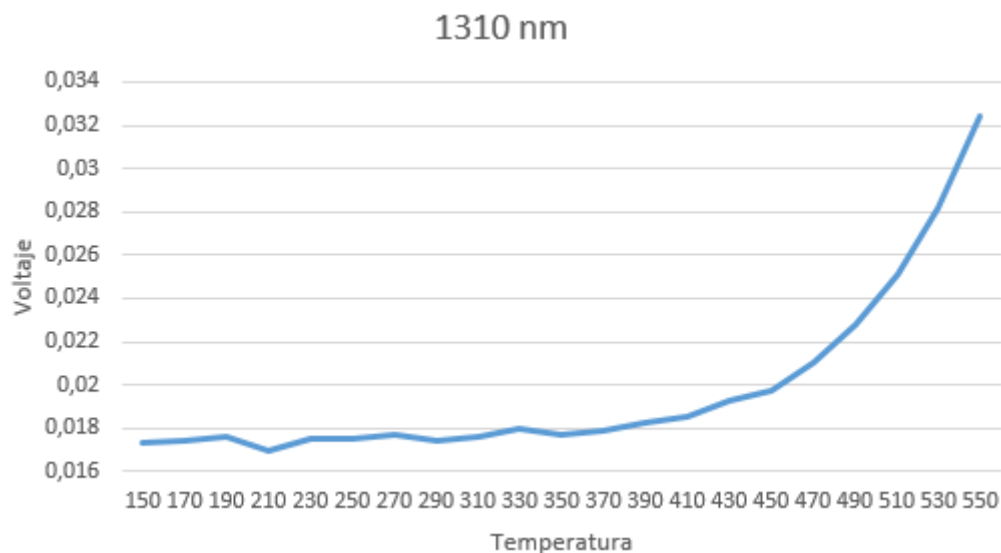


Ilustración 24 Curva de calibración del pirómetro con conmutador a 1310nm

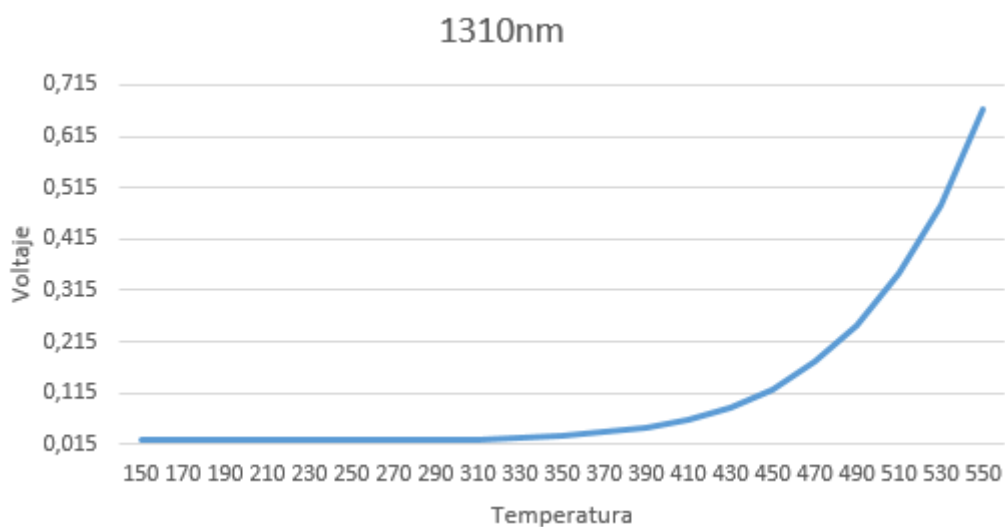


Ilustración 25 Curva de calibración del pirómetro sin conmutador a 1310nm

6 Conclusiones

En este trabajo se han caracterizado los componentes que forman un pirómetro por fibra óptica a dos colores.

Además, se ha estudiado el efecto de la inclusión de un nuevo elemento, un conmutador óptico, en el pirómetro a dos colores.

Se ha realizado un estudio para analizar las distintas formas de procesar los datos medidos con el fin de obtener las medidas más precisas.

Se ha realizado un análisis de ruido de los componentes activos del sistema, el fotodetector y la tarjeta de adquisición de datos. Se ha determinado que el elemento que limita la temperatura mínima medible del pirómetro es el ruido del fotodetector.

En el fotodetector se identificó un ruido de valor promedio de unos 17,3 mV. Este ruido es el que limita las medidas para bajas temperaturas.

En cuanto al tratamiento de las medidas se observa que se mejora la precisión de las mismas si se utiliza el conmutador para seleccionar los valores centrales de las medidas en cada ciclo.

Si se compara el funcionamiento del sistema con y sin conmutador, se aprecia que el conmutador puede ayudar a mejorar la precisión de las medidas, pero se limita algo más la temperatura mínima de medida, especialmente en el canal de 1550nm.

A nivel personal este trabajo me ha servido para aprender de un campo nuevo para mí como lo era la pirometría por fibra óptica. También he aprendido a manejar un nuevo entorno de programación gráfica como es LabView, me he familiarizado con la búsqueda de artículos científicos y analizar su contenido con el fin de extraer la información relevante.

7 Trabajos futuros

A raíz de los resultados obtenidos en este trabajo considero interesante abrir las siguientes líneas de investigación para trabajos futuros:

- Implementar un programa informático que permita indicar en tiempo real la temperatura medida por el pirómetro.
- Desarrollar un sistema de *Lock-In* virtual que reduzca el ruido de la señal mejorando así la calidad de las medidas.
- Relacionar las medidas a ambas longitudes de onda (1310nm y 1550nm) con el fin de aprovechar las ventajas en la medida por pirometría a dos colores.

8. Normativa

Si bien aún no se ha desarrollado una normativa específica para la medida de temperatura en procesos de mecanizado industrial con cortes mediante tornos mecánicos, el sistema de medida basado en pirometría por fibra óptica planteado en este trabajo debería operar acorde a la norma ASTM E21-09 [17]. Dicha norma regula los ensayos a tensión sobre elementos metálicos a altas temperaturas. Engloba aquellas pruebas en las que se somete a los metales a esfuerzos por tensión axial, o ensayos de deformación por flexión, con control de temperatura mediante termopares.

El proceso industrial para el que se ha planteado este trabajo fin de grado es un proceso de corte mediante un torno industrial con un sistema de medida de temperatura sin contacto. El proceso es, evidentemente, distinto a los recogidos por la norma E21-09 pero se va a considerar que los apartados respectivos a la mínima variación de temperatura medible se pueden aplicar al sistema planteado en este trabajo.

La norma E21-09 establece que para temperaturas inferiores a los 1000°C el sistema de control de temperatura debe ser capaz de detectar saltos de $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Para temperaturas superiores a los 1000°C el salto de temperatura mínimo que debe captar el sistema es de $\pm 6^{\circ}\text{C}$.

Analizando los datos obtenidos en nuestro sistema de medida presentados en el apartado 5.2.3, podemos comprobar que una variación de 3°C en nuestro sistema de medida implica una variación de 0,01734V. Debido al ruido del fotodetector el sistema no sería capaz de detectar el salto de temperatura, por lo tanto, no cumpliría con la normativa E21-09. Esto podría solucionarse al introducir un *Lock-In* virtual en el sistema. De esa forma el ruido de la señal se reduciría y sería posible cumplir con la normativa para temperaturas inferiores a 1000°C.

Puesto que se espera que la potencia óptica aumente conforme aumente la temperatura, con lo que el sistema ganará precisión en la medida conforme la temperatura aumenta, nuestro sistema debería ser capaz de detectar saltos de $\pm 6^{\circ}\text{C}$ para temperaturas superiores a los 1000°C cumpliendo así con las especificaciones de la norma E21-09.

9. Impacto socioeconómico, presupuesto y diagrama de Gantt

9.1 Impacto socioeconómico

Al desarrollar un sistema de medida sin contacto para procesos de mecanizado industrial se tendrá un mayor control de la temperatura sobre dichos procesos.

Esto nos permitirá obtener un mejor rendimiento de los procesos debido a la menor cantidad de desperfectos en los procesos de mecanizado.

Al tener un mayor control sobre los procesos los acabados serán de mejor calidad. Llegando a poder producir materiales más livianos y resistentes. Al emplear estos nuevos materiales en la industria automovilística o aeronáutica obtendríamos vehículos más ligeros sin perder prestaciones, lo que derivaría a un menor consumo de combustible generando de esta forma un impacto positivo para el medio ambiente.

Vemos por tanto que el desarrollo de este tipo de sistema de medida de temperaturas no solo es beneficioso para la industria, sino para el resto de la sociedad.

9.2 Presupuesto

A la hora de realizar el presupuesto se ha seleccionado un periodo de amortización de 5 años para los equipos utilizados durante el desarrollo de este trabajo. Puesto que este trabajo ha durado unos 6 meses, medio año, el coste imputado al proyecto por el uso de los equipos se ha calculado de la siguiente forma:

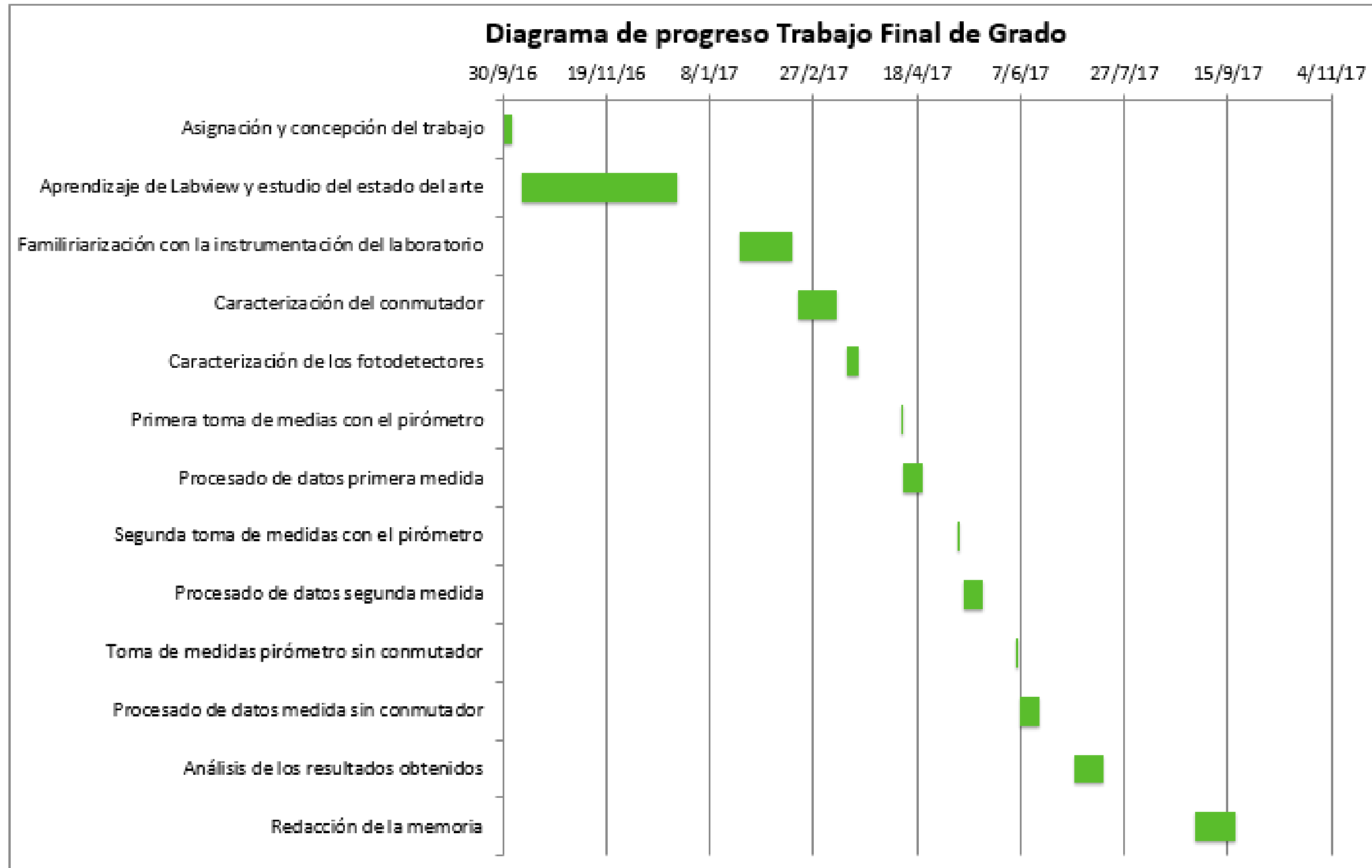
$$\text{Gasto a imputar} = \text{Precio equipo} * \frac{1}{5 \text{ años}} * 0,5 \text{ años de uso}$$

Para calcular el coste de las horas de trabajo del alumno se ha consultado la tabla salarial para proyectos de la Universidad Carlos III de Madrid en su versión del año 2016 y se ha escogido el salario hora promedio de un ingeniero técnico.

Cantidad	Unidad de medida	Descripción	Precio / Unidad de medida	Precio total €	Precio tras amortización
		Bloque I Ordenadores y programas informáticos			
1	Unidad	Ordenador	990	990	99
1	Unidad	Licencia Labview	206,5	206,5	20,65
1	Unidad	Sistema Operativo Windows 7	175	175	17,5
1	Unidad	Licencia Microsoft Office	149	149	14,9
		Bloque II Materiales de Laboratorio			
1	Unidad	Agiltron LB Quad 1x1 Multimode Switch	243,77	243,77	243,77
1	Unidad	Yamasaki Power Meter TP01	360	360	36
1	Unidad	EXFO PM-1100 POWER METER	800	800	80
1	Unidad	SOF-131-C LASER SOURCE	500	500	50
1	Unidad	YOKOGAWA AQ2201 FRAME CONTROLLER	1900	1900	190
1	Unidad	Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009	299,9	299,9	29,99
1	Unidad	Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6366	4959,9	4959,9	495,99
1	Unidad	Fotodetector Edmund Optics InGaAs Photodiode	399	399	39,9
1	Unidad	Fuente de alimentación RS PRO 4303 4 CH	340	340	34
1	Unidad	Generador de funciones Agilent 33120A	750	750	75
1	Unidad	Pozo calefactor ISOTECH JUPITER 650 B	3844,75	3844,75	384,475
1	Unidad	Separador de potencia óptica 90% 10%	209	209	209
1	Metro	Fibra Óptica Monomodo Angulada	1,4	1,4	1,4
1	Unidad	VOA50 - SM Variable Attenuator, 1310/1550 nm, 50 dB, In-Line	220	220	22
1	Metro	Fibra Óptica Multimodo	2,3	2,3	2,3
		Bloque III Horas de trabajo			
300	Horas	Horas de trabajo ingeniero técnico	23,43	7029	7029
TOTAL					9074,875

9.3 Diagrama de Gantt

En el siguiente diagrama se muestra la planificación del trabajo desarrollado



10. Referencias

- [1] A. Tapetado, "Fiber Optic Sensors and Self-reference Techniques for Temperature Measurements in Different Industrial Sectors (Thesis)," Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [2] J. F. López Moyano, "Medida de temperatura en procesos de mecanizado industrial a través de pirometría por fibra óptica (Trabajo Fin de Máster)." Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, p. 89, 2016.
- [3] M. A. Pérez García, J. C. Álvarez Antón, J. C. Campo Rodríguez, F. J. Ferrero Martín, and G. J. Grillo Ortega, *Instrumentación Electrónica*. Madrid, 2004.
- [4] Eduardo Nestor Álvarez, "Termómetros Universidad de Buenos Aires." [Online]. Available: <http://laboratorios.fi.uba.ar/lscm/termometros.pdf>. [Accessed: 20-Jul-2007].
- [5] "Termómetros infrarrojos." [Online]. Available: <http://www.termometrosinfrarrojos.com>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [6] "Wedgwood Museum." [Online]. Available: <http://www.wedgwoodmuseum.org.uk/learning/discovery-packs/pack/lives-of-the-wedgwoods/chapter/pyrometer>.
- [7] R. A. Wolfe and A. Arbor, "PYROMETER," 2695364, 1954.
- [8] F. R. A. Jorgesen and M. Zuiderwyk, "Two-colour pyrometer measurement of temperature of individual combusting particles," *IOP Sci.*, vol. 18, p. 7, 1984.
- [9] A. Tapetado, J. Diaz-Alvarez, M. H. Miguelez, and C. Vazquez, "Two-color pyrometer for process temperature measurement during machining," *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 4, pp. 1380–1386, 2016.
- [10] A. Tapetado, C. Vazquez, J. Diaz-Alvarez, E. Garcia, and M. H. Miguelez, "Optical-Fiber Pyrometer Positioning Accuracy Analysis," *Spie Digit. Libr.*, vol. 9916, 2016.
- [11] X. Ma and G.-S. Kuo, "Optical switching technology comparison: optical MEMS vs. other technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 11, pp. S16–S23, 2003.
- [12] "Edmund Optics Photodetector." [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.es/imaging-lenses/telecentric-lenses/ingaas800-1700nm-1.0mm-photodiode-receiver-module/#specs>. [Accessed: 03-Aug-2017].
- [13] J. L. Santos and F. Farahi, *Handbook of Optical Sensors*, 1st ed. London: CRC Press, 2015.
- [14] Y. (USA) Mackowiak, Verena (GmbH) Peupelmann, Jens (GmbH) Ma and A. Gorges, "NEP - Noise Equivalent Power," Newton, USA.

- [15] A. Tapetado, E. Garcia, C. Vazquez, and J. Diaz-Alvarez, "Optical Fiber Pyrometer Positioning Accuracy During Machining," *Spie Digit. Libr.*, vol. 9916, 2015.
- [16] Z. Bielecki, "Maximisation of signal-to-noise ratio in infrared radiation receivers," *OPTO-ELECTRONICS Rev.*, p. 8, 2002.
- [17] ASTM E21-09, Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org.

Anexos

Anexo 1 Hoja de Características Tarjeta de Adquisición NI USB 6366

Se presenta la hoja de características referente a las entradas analógicas, pues son las entradas empleadas en este trabajo final de grado. Para más información consultar el enlace web <http://www.ni.com/documentation/en/multifunction-io-device/latest/usb-6366/specs/> [Última vez visitado 26/09/2017]


DEVICE SPECIFICATIONS

NI 6366

X Series Data Acquisition 2 MS/s/ch, 8 AI, 24 DIO, 2 AO

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted. For more information about the NI 6366, refer to the *X Series User Manual* available from ni.com/manuals.

Analog Input

Number of channels	8 differential
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the <i>AI Absolute Accuracy</i> section.
Sample rate	
Single channel maximum	2.00 MS/s
Minimum	No minimum
Timing resolution	10 ns
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Input coupling	DC
Input range	±1 V, ±2 V, ±5 V, ±10 V
Maximum working voltage for all analog inputs	
Positive input (AI+)	±11 V for all ranges, Measurement Category I
Negative input (AI-)	±11 V for all ranges, Measurement Category I
 Caution Do not use for measurements within Categories II, III, and IV.	
CMRR (at 60 Hz)	75 dB
Bandwidth	1 MHz
THD	-80 dBFS



Anexo 2 Hoja de características Tarjeta de Adquisición NI USB 6009

Se presenta la hoja de características referente a las entradas analógicas, pues son las entradas empleadas en este trabajo final de grado. Para más información consultar el enlace web <http://www.ni.com/pdf/manuals/375296b.pdf> [Última vez visitado 26/09/2017]

DEVICE SPECIFICATIONS

NI USB-6009

USB, 8 AI (14-Bit, 48 kS/s), 2 AO (12-Bit), 12 DIO

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted. For more information about the NI USB-6009, refer to the *NI USB-6008/6009 User Guide* available from ni.com/manuals.

Analog Input

Analog inputs	
Differential	4
Single-ended	8, software-selectable
Input resolution	
Differential	14 bits
Single-ended	13 bits
Maximum sample rate (aggregate)	48 kS/s, system dependent
Converter type	Successive approximation
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Differential	± 20 V ¹ , ± 10 V, ± 5 V, ± 4 V, ± 2.5 V, ± 2 V, ± 1.25 V, ± 1 V
Single-ended	± 10 V
Working voltage	± 10 V
Input impedance	144 k Ω

¹ ± 20 V means that $|AI+ - (AI-)| \leq 20$ V. However, AI+ and AI- must both be within ± 10 V of GND. Refer to the *Taking Differential Measurements* section of the *NI USB-6008/6009 User Guide* for more information.



Anexo 3 Hoja de características conmutador óptico

LightBend™ Quad 1x1 Multimode Fiberoptic Switch (Bidirectional)

(Protected by U.S. patent 6823102 and pending patents)

Product Description

The LB Quad 1x1 Multimode Fiberoptic switch is a highly integrated single device with 8 fiber ports. Based on an Agiltron's pending patent, the switch is designed especially for protection and restoration applications. The switch is activated by a 5V pulse between two states and latching operation preserves the selected optical path after the drive signal has been removed. The switch has integrated electrical contact based position sensors. The proprietary simple design significantly reduces moving part position sensitivity, offering unprecedented high stability as well as unmatched low cost. Electronic driver is available for this series of switches. The switch is bidirectional.

We offer tight-bend-fiber version, which reduces the minimum bending radius from normal 15 mm to 7 mm. This feature enables smaller overall foot print.



Features

- Low Optical Distortions
- 8 Ports Integration
- High Isolation
- High Reliability
- Fail-Safe Latching
- Epoxy-Free Optical Path
- Low Cost

Performance Specifications

LB Series Quad 1x1 MM Switch	Min	Typical	Max	Unit
Wavelength	850, 1310, 1410, 1550			nm
Insertion Loss * **		0.6	0.9	dB
Wavelength Dependent Loss			0.25	dB
Cross Talk*	35			dB
Return Loss*, **	35			dB
Switching Time		10	20	ms
Repeatability			± 0.02	dB
Durability	10 ⁷			Cycles
Operating Optical Power		300	500	mW
Operating Voltage	4.5	5	6	V
Operating Current		30	60	mA
Voltage Pulse Width (square)		20		ms
Switch Type	Latching / Non-Latching			
Operating Temperature	0 ~ 70			
Fiber Type	MM62.5/125 or MM50/125			
Storage Temperature	-40 ~ 85			
Package Dimension	30.0L x 30.0W X 8.5H			

Notes:

* Within operating temperature and with light source CPR <14 dB.

** Excluding Connectors.

*** Our device is designed and optimized for certain laser launch condition which is characterized as CPR value. In general, if application exceeds the specified CPR value, optical performance will become worsen.

Applications

- Protection
- Instrumentation



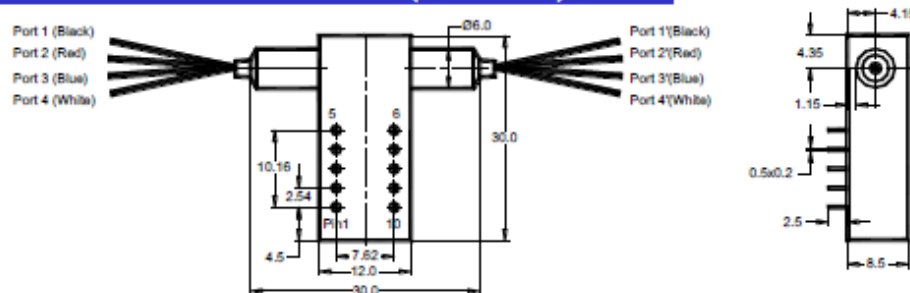
Revision: 060-11
02-10-16

15 Presidential Way, Woburn, MA 01801 Tel: (781) 935-1200 Fax: (781) 935-2040

www.agiltron.com

LightBend™ Quad 1x1 Multimode Fiberoptic Switch

Mechanical Dimensions (Unit:mm)



Electrical Connector Configurations

The load is a resistive coil which is activated by applying 5V (draw ~ 40mA). Applying too long pulse for the latching version will heat up the device. Agiltron offers a computer control kit with TTL and USB interfaces and Windows™ GUI. We also offer RS232 interface as an option - please contact Agiltron sales.

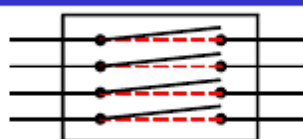
Latching Type (Single Coil)

Optical Path	Electric Drive				Status Sensor			
	Pin 1	Pin 10	Pin 5	Pin 6	Pin 2-3	Pin 3-4	Pin 7-8	Pin 8-9
1→1', 2→2' 3→3', 4→4'	GND	5V Pulse	N/A	N/A	Close	Open	Open	Close
Block	5V Pulse	GND	N/A	N/A	Open	Close	Close	Open

Non-Latching Type

Optical Path	Electric Drive				Status Sensor			
	Pin 1	Pin 10	Pin 5	Pin 6	Pin 2-3	Pin 3-4	Pin 7-8	Pin 8-9
1→1', 2→2' 3→3', 4→4'	No Power		N/A	N/A	Close	Open	Open	Close
Block	5V	GND	N/A	N/A	Open	Close	Close	Open

Functional Diagram



LB Quad 1x1 MM Switch

Ordering Information

LBQU-	Type	Wavelength	Switch	Package	Fiber Type	Fiber Length	Connector
LBQU-11	1x1 Latching=11	1060=1	Latching(SingleCoil)=2	Standard=1	MM 50/125=5	Bare fiber=1	None = 1
LBQU-10	1x1 N/O*=10	C=L=2	Non-latching=3	Special=0	MM62.5/125=6	900um tube=3	FC/PC = 2
LBQU-1C	1x1 N/C**=1C	1310=3	Special=0			1.0=3	FC/APC = 3
LBQU-00	Special=00	1410=4				Special=0	SC/PC = 4
		1550=5					SC/APC = 5
		650=6					ST/PC = 6
		780=7					LC = 7
		850=8					Duplex LC=8
		1310 & 1550=9					Special = 0
		850 & 1310=A					
		Special=0					

* N/O: LB Quad 1x1 MM Switch Non-Latching Normally Open.

** N/C: LB Quad 1x1 MM Switch Non-Latching Normally Close.



Anexo 4 Caracterización de conmutadores desarrollada por los investigadores de GDAF

EDMUND OPTICS InGaAs 1mm PHOTODETECTORS	
Int. Serial. Number	-
Wavelength range	800nm to 1700 nm
Power range	-
Applicable fiber type/Active Area	Ø1mm (0,8mm2)
Total Uncertainty	-
Noise NEP (pW/√Hz)	0,02
Noise RMS (µVrms) for 1kHz	47,43µV
Dark Noise Level (dBm)	-80 (-120; f > 5MHz)
Theoretical Dark Noise Level (dBm) 1308nm (2)	-
Theoretical Dark Noise Level (dBm) 1532nm (2)	-
Dark Current (nA)	-
Minimal averaging time	-
Bandwidth	DC to 2kHz (LG), DC to 0,5kHz (HG)
BNC Output	Yes
Gain Setting	-
Cool System	2 levels, High and low
URL	http://www.edmundoptics.es/testing-

PRICE	391,02 €
-------	----------

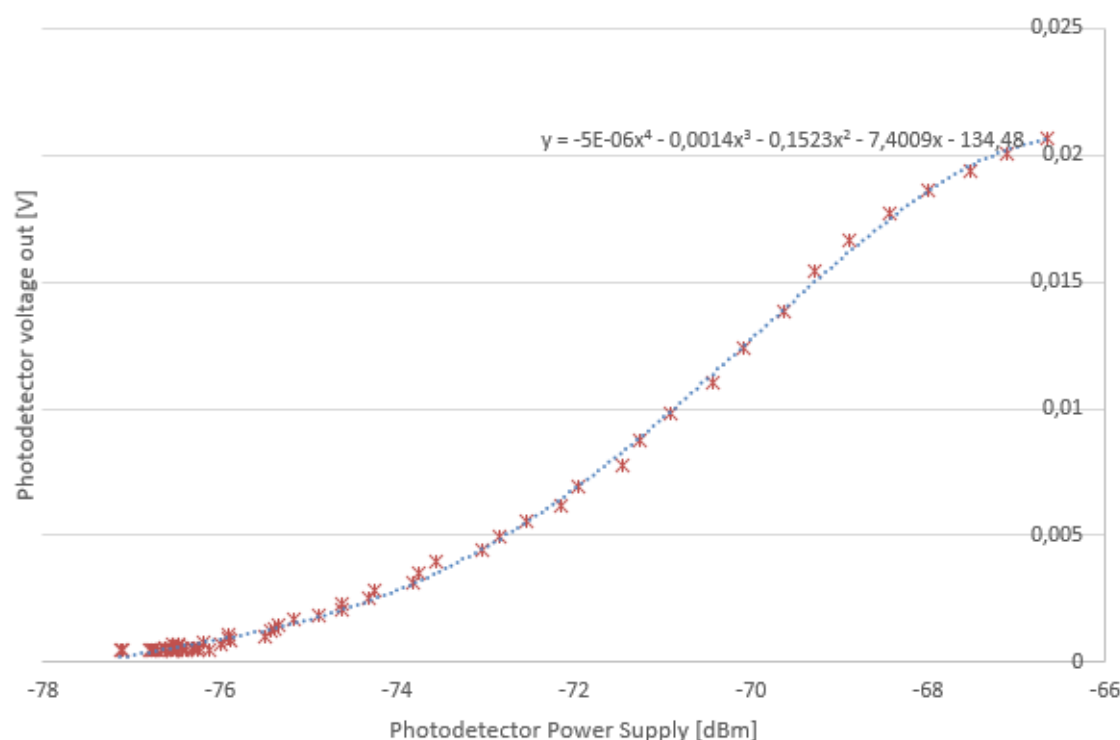
EXP. Power Range (dBm)	-72,85	-70,85
Gain (dB)	High	Low
EXP. Electrical Noise (µVrms)(1)	491	436
EXP. Wavelength	1308	1308
Responsivity (A/W)	0,9	0,9
EXP. Impedance	AC	AC

EXP. Power Range (dBm)	-75,49	-72,93
Gain (dB)	High	Low
EXP. Electrical Noise (µVrms)(1)	502	436
EXP. Wavelength	1532	1532
Responsivity (A/W)	0,95	0,95
EXP. Impedance	AC	AC
NEP (0,27kHz) (dBm)	-94,83	-94,83

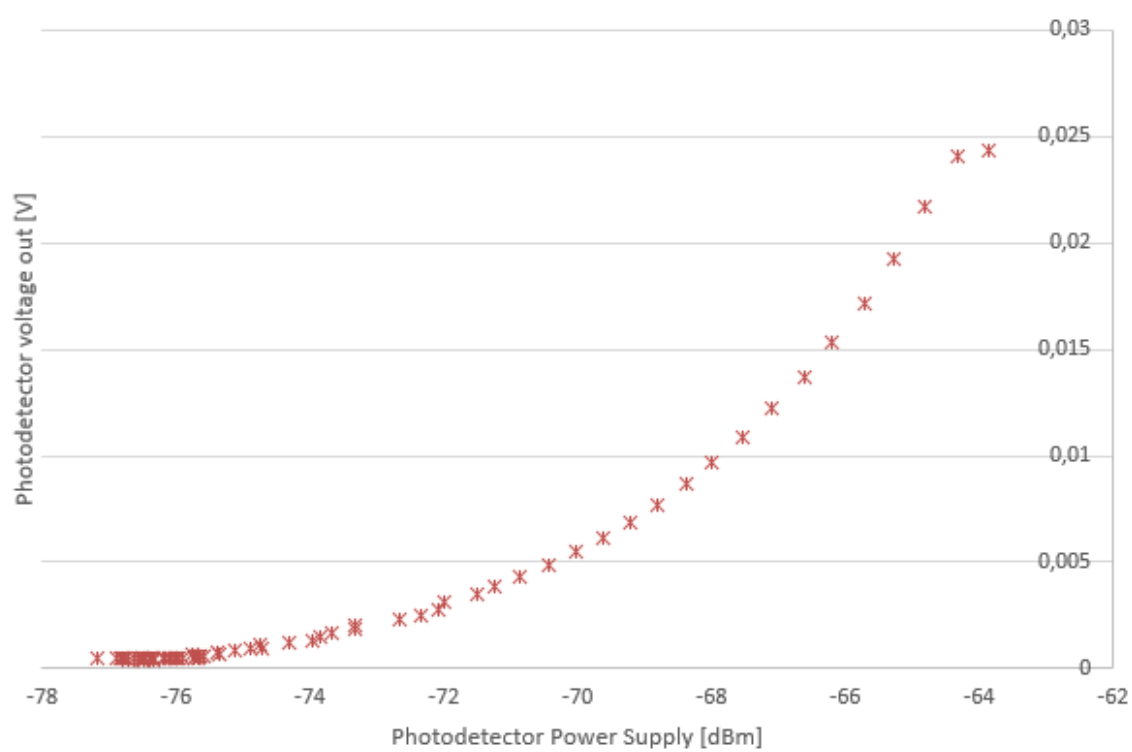
(1)Modulating square wave at 0,27kHz; used oscilloscope R&S1022 conf. 5mV/div in vertical axis (conf. noise 180mV); Filter at 20MHz

(2)Obtain from the datasheet values
(italics)Obtain from the datasheet values

Edmund Optics InGaAs 1mm PhD(1308nm, HIGH GAIN)



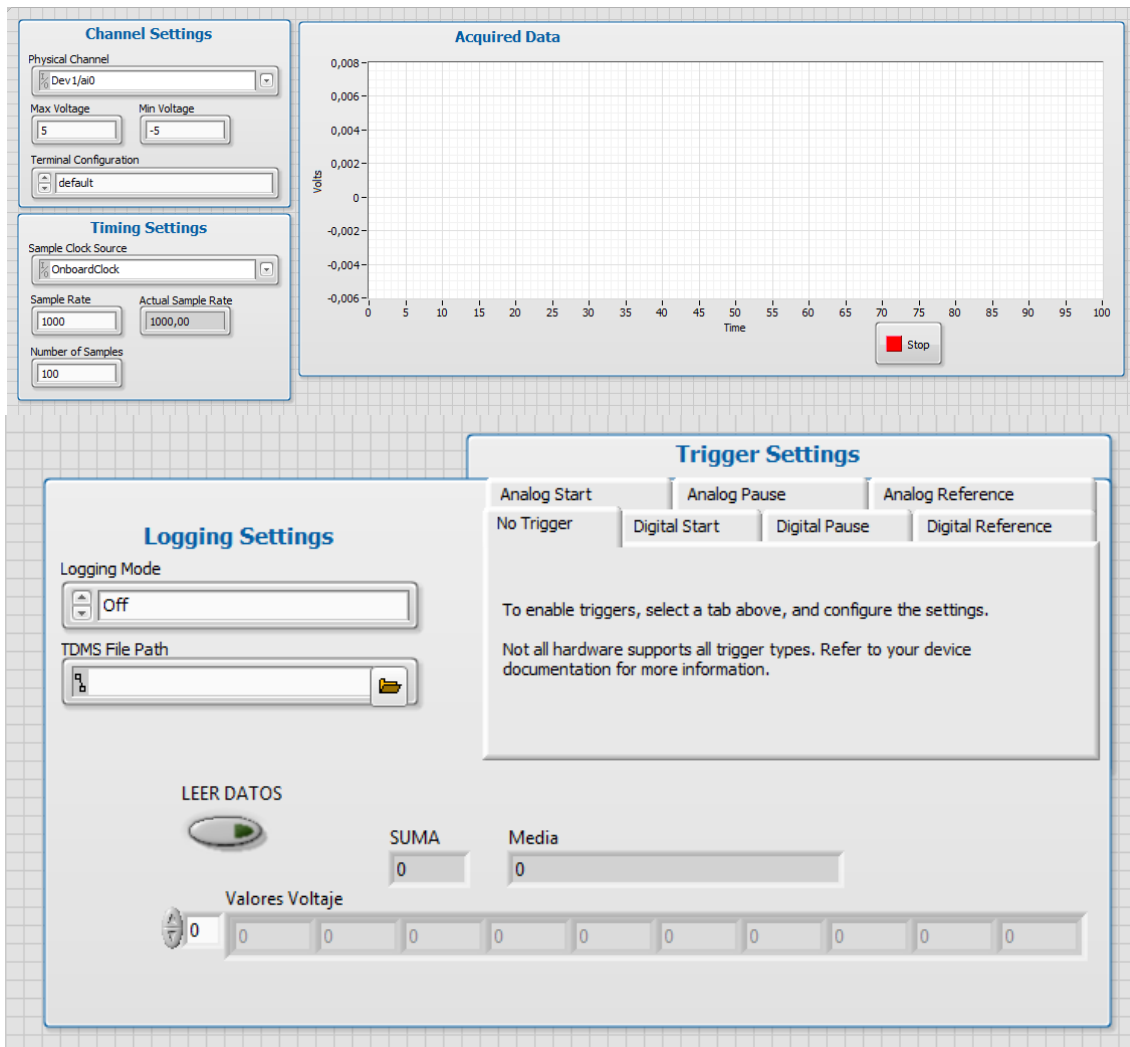
Edmund Optics InGaAs 1mm PhD(1308nm, LOW GAIN)



Anexo 5 Código en LabView

A continuación, se muestra el programa en LabView implementado para la toma de datos con la tarjeta de adquisición NI USB 6009.

En el panel principal se puede configurar el tipo de medida a realizar, canal de entrada, rango de adquisición de datos, frecuencia de muestreo y número de muestras a tomar. Además, al activar el botón LEER DATOS el panel mostrará el valor en tiempo real de todos los datos tomados, su valor medio y el valor de su suma.



En el diagrama de bloques se presenta la programación realizada para poder obtener estos datos.

